



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



ZAVRŠNI RAD

Kristijan Nuić

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc.dr.sc. Dragutin Lisjak

Student:

Kristijan Nuić

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **KRISTIJAN NUIĆ**

Mat. br.:0035174002

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

PRIMJENA FEROGRAFIJE U ODRŽAVANJU

Naslov rada na
engleskom jeziku:

APPLICATION OF FERROGRAPHY IN THE MAINTENANCE

Opis zadatka: 1. Opisati ferografiju kao metodu preventivnog održavanja opreme analizom ulja,
2. Opisati vrste i karakteristike testova za određivanje količine čestica u lubrikantima,
3. Detaljno opisati i prikazati ferografske uređaje i princip njihova rada,
4. Zaključak.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Dragutin Lisjak

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc.dr.sc. Dragutinu Lisjaku na pruženoj literaturi i iskazanoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Posebno bih se htio zahvaliti svojim roditeljima, koji su mi tijekom cijelog studija pružili bezrezervnu podršku, kako moralnu, tako i financijsku, bez koje sigurno ne bih stigao do pisanja ovog rada.

Kristijan Nuić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
1. UVOD.....	1
2. PRIMJENA FEROGRAFIJE U ODRŽAVANJU	2
2.1. ANALITIČKA FEROGRAFIJA	3
2.2. FEROGRAFIJA IZRAVNIM OČITAVANJEM	3
2.3. KARAKTERISTIČNE ČESTICE TROŠENJA KOJE SE MOGU OTKRITI FEROGRAFIJOM	4
2.3.1. Normalne čestice uslijed trošenja struganjem	4
2.3.2. Rezne ili abrazivne čestice trošenja.....	5
2.3.3. Sferne čestice trošenja	6
2.3.4. Čestice trošenja teškog klizanja	6
2.3.5. Lamelaste čestice trošenja	7
2.3.6. Čestice trošenja zupčanika	7
2.4. FEROGRAFIJA JUČER I DANAS	8
3. METODE ODRŽAVANJA TEMELJENE NA KOLIČINI ČESTICA U LUBRIKANTIMA	9
3.1. KARL FISCHER VODENI TEST	9
3.1.1. Volumetrijska metoda	9
3.1.2. Kulometrijska metoda	10
3.2. ICP SPEKTROSKOPIJA	11
3.2.1. ICP-AES	12
3.2.2. Opis uzorka	13
3.2.3. Plazma	13
3.3. BROJAČ ČESTICA	14
3.3.1. Tehnike brojanja čestica	14
3.3.2. Analiza rješenja dobivenih brojačem čestica	15
3.3.3. Pretvaranje broja čestica u iso kod	16
3.4. TEST VISKOZNOSTI	16
3.4.1. Metoda testiranja viskoznosti viskometrom s kapilarnom cijevi	16
3.4.2. Metoda testiranja okretnim viskometrom	18
3.5. INFRACRVENA SPEKTROSKOPIJA S FOURIEROVOM TRANSFORMACIJOM	19
3.5.1. Instrumenti potrebni za provedbu testiranja	21
3.6. UKUPNI KISELINSKI BROJ	23
4. FEROGRAFSKI UREĐAJI	24
4.1. FEROGRAF S IZRAVNIM OČITAVANJEM DR-6	24

4.1.1. Princip rada	25
4.2. FERROGRAM MAKER FM-6	26
4.2.1. Princip rada	27
4.3. FEROSKOP FS-6.....	28
4.4. SOFTVER ZA SNIMANJE SLIKA ISPITIVANOG DIJELA	30
5. VAŽNOST FEROGRAFIJE ZA ODRŽAVANJE	31
5.1. PRIMJER FEROGRAFIJE	33
5.2. REZULTATI ISPITIVANJA	35
6. ZAKLJUČAK	41
7. LITERATURA.....	42

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Normalne čestice uslijed trošenja struganjem.....	5
Slika 2.2 Rezne ili abrazivne čestice trošenja	5
Slika 2.3 Sferne čestice trošenja.....	6
Slika 2.4 Čestice trošenja teškog klizanja	6
Slika 2.5 Lamelaste čestice trošenja.....	7
Slika 2.6 Čestice trošenja zupčanika	7
Slika 3.1 Uređaj za provođenje volumetrijske metode.....	10
Slika 3.2 Uređaj za provođenje kulometrijske metode.....	10
Slika 3.3 Princip ICP spektroskopije.....	11
Slika 3.4 Uređaj za provođenje ICP spektroskopije.....	12
Slika 3.5 Valne duljine pobuđenih stanja.....	14
Slika 3.6 Princip brojanja čestica	15
Slika 3.7 Uređaj za testiranje viskoznosti	17
Slika 3.8 Uređaj za mjerenje viskoznosti sa okretnim viskometrom	19
Slika 3.9 Sastavnica IC-FT-a	20
Slika 3.10 Primjer Fourierove transformacije	21
Slika 3.11 Princip IC-FT-a	22
Slika 3.12 Uređaj za mjerenje ukupnog kiselinskog broja.....	23
Slika 4.1 DR-6 ferograf	24
Slika 4.2 Princip rada DR-6 ferografa.....	26
Slika 4.3 Ferrogram maker FM-6.....	27
Slika 4.4 Princip rada FM-6	28
Slika 4.5 Raspored čestica na ferogramu	28
Slika 4.6 Feroskop FS-6	29
Slika 4.7 Pogled kroz feroskop	30
Slika 4.8 Softver za snimanje slika ispitivanog dijela.....	30
Slika 5.1 Ferograf s direktnim očitanjem PMA 90 S	34
Slika 5.2 Uređaj TCM-U	35
Slika 5.3 Promjena WPC-a po vremenu.....	37
Slika 5.4 Tragovi trošenja na klipu	40
Slika 5.5 Tragovi trošenja na cilindru	40

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Broj čestica određenih veličina	15
Tablica 3.2 ISO i SAE sustav ocjenjivanja viskoznosti	18
Tablica 4.1 Karakteristike DR.6 ferografa	25
Tablica 4.2 Karakteristike FM-6	27
Tablica 5.1 Izmjerene vrijednosti WPC i TCM za vrijeme trajanja ispitivanja	36
Tablica 5.2 Promjena svojstava ulja i sadržaja metala u ulju za vrijeme trajanja ispitivanja ..	39

SAŽETAK

U ovom radu opisana je važnost ulja i metoda analize ulja za održavanje tehničkih sustava. Kao najvažnija metoda detaljno je opisana ferografija. Prikazan je princip rada dvije vrste ferografije: analitičke ferografije te ferografije izravnim očitavanjem. Također je opisana povijest ferografije kao i vrste čestica koje se pojavljuju u ferografiji.

Opisani su i razni testovi pomoću kojih se otkrivaju sastavni dijelovi čestice i količina čestica koja se nalazi u ulju, koji ukazuju na moguće probleme sustava. To su: Karl Fischer vodeni test, ICP spektroskopija, brojač čestica, test viskoznosti, infracrvena spektroskopija sa Fourierovom transformacijom, te ukupni kiselinski broj.

U sljedećem poglavlju opisani su uređaji potrebni za provođenje ferografije i princip njihovog rada, te je prikazana važnost ferografije za održavanje. Na kraju rada dan je primjer ferografije, točnije ispitivanje ulja četverotaktnog motora gdje se mjerio postotak trošenja čestica te udio nečistoća u ulju.

1. UVOD

Ulja se susreću svuda u transportnim granama privrede i industrije, a posebno u metalnoj i prerađivačkoj industriji. Postoje ulja za podmazivanje, hidraulična ulja, termalna ulja za prijenos topline... Sva ulja su podložna određenim promjenama svojstava, dok se nalaze u fazi mirovanja, a naročito tijekom eksploatacije. Ulje u radu gubi svoju kvalitetu i postaje nečisto, odnosno stari. Promjene svojstava ulja posljedice su prije svega njihovog kemijskog sastava. Najveći utjecaj na promjenu kvalitete ulja za podmazivanje imaju prije svega: temperatura, tlak i brzina u sustavu za podmazivanje, prisutnost vlage i kisika iz zraka, produkti izgaranja, metalni sastojci itd. Veliki utjecaj imaju još prašina i drugi oblici nečistoća, te djelovanje mikroorganizama. Laboratorijske analize ulja postoje gotovo koliko postoje i ulja za podmazivanje. Te su se analize radile kako bi se ustanovilo stanje ulja, odnosno starost ili neočišćenost, s ciljem pravodobne zamjene ulja kako bi se spriječila oštećenja dijelova strojeva prouzročena onečišćenjem ili degradacijom ulja. Pravilo je u održavanju strojeva da je ulje „životna krv“ stroja i da mora biti pažljivo održavano. Prvotno održavanje se svodilo na način da je dovoljno periodično mijenjati ulje u sustavu. Takav način održavanja sustava ulja prevladavao je godinama. Današnje usredotočivanje na troškove u poslovanju svakog poduzeća, kao i na okoliš, sve više rezultira pritiscima na menadžere za primjenu metode održavanja i zamjene ulja prema stanju radije nego na temelju radnih sati, kalendarskog roka ili prema brojaču kilometara.

Ako je ulje kontaminirano vodom ili mehaničkim nečistoćama, vrlo ga je lako pročistiti raznim filtracijama ili centrifugiranjem i na taj način mu produžiti vijek trajanja i ponovno ga koristiti. Međutim potrebno je imati na umu da pročišćavanje ulja svakako može produljiti radni vijek strojeva, ali ne može otkloniti uzorke kao što su abnormalno trošenje izazvano raznim mehaničkim problemima, na primjer ekscentriranost, zamor materijala i sl. Izmjene i pročišćavanje ulja mogu privremeno ublažiti problem ali će zahvat održavanja za otklanjanje uzorka problema biti neizbježan. Troškovi održavanja maziva, strojeva i opreme stalno se povećavaju. Rezervni dijelovi, radna snaga i zastoji sve su skuplji, pa zauzimaju sve značajnije mjesto u dobrom programu rukovođenja održavanjem. Tako i praćenje stanja stroja na temelju analiza ulja postaje sve važnije u programima održavanja. Kao posljedica ovakvog razvoja održavanja analize ulja za podmazivanje spadaju u dvije kategorije:

- analiza rabljenog ulja koja utvrđuje stanje ulja
- ferografija ili analiza čestica trošenja koja utvrđuje stanje komponenata stroja/opreme

2. PRIMJENA FEROGRAFIJE U ODRŽAVANJU

Ferografija je metoda kojom se izdvajaju čestice trošenja iz uzorka ulja za podmazivanje (veće od 1 mikrometra), te se slažu prema veličini na prozirni supstrat za proučavanje ili uz vrlo glatku cijev za procjenu. Ona također predstavlja tehniku preventivnog održavanja. Čestice se proučavaju mikroskopom da bi se razotkrila njihova točna veličina, koncentracija, kompozicija, morfologija i stanje površine željeznih i neželjeznih potrošenih čestica. Čestice trošenja treba najprije izdvojiti iz medija kojim su nošene, a to je najčešće ulje za podmazivanje, ispušni plinovi dieslovog motora, rashladni mediji kod obrade odvajanjem čestica, mlaz mlaznog motora i sl. To odvajanje čestica se provodi putem magnetskog privlačenja odgovarajućim permanentnim magnetima. Metoda je od izuzetne koristi kod već uspostavljenog procesa habanja. Rezultati uključuju izvještaj o veličini, morfologiji i količini čestica od nebojenih metala i nečistoća. Predstavlja dijagnostičko-prognozirajuću tehniku koja nudi pogodan način točnog procjenjivanja on-line stanja podmazanih dijelova u kontaktu bez isključivanja stroja. Uzorak ulja uzima se s pažljivo odabranog mjesta prije filtra kako bi se osigurala reprezentativna koncentracija čestica trošenja. Ferografija se zatim primjenjuje na magnetski odvojene čestice. Mikroskopskim ispitivanjem ovih čestica može se utvrditi uzrok trošenja. Dakle, ferografijskom metodom utvrđuje se stanje komponenti stroja bez rastavljanja stroja radi pregleda i inspekcije. [1]

Prednosti ferografije su:

- osjetljivost u širokom rasponu veličina čestica trošenja – osjetljivost instrumenata ferografije da otkrivaju čestice veličine od 1 do 250 mikrometara
- razdvaja čestice po veličini – ferogram jasno razlikuje i odvaja čestice trošenja po veličini; mikroskopski pregled ovih ferograma ukazuje na probleme stroja koje druge metode ne mogu otkriti
- identificira legure čestica trošenja – ferografijskim pregledom moguće je identificirati različite legure u česticama trošenja, kako željezne tako i drugih metala
- identificira izvore trošenja – ferografijske procedure omogućuju identifikaciju komponente koja se abnormalno troši

Ferografska analiza čestica trošenja je proces u dvije etape, tj. dvije ferografijske tehnike: analitička ferografija i ferografija izravnim očitavanjem, DR (Direct Read)

ferografija. Ferografija predstavlja jako učinkovitu metodu za ukazivanje na potrebe održavanja dijelova stroja. Metodu je izmislio Vernon C. Westcott. [2]

Prvi put je opisana 1972. godine kao metoda za izdvajanje i proučavanje čestica materijala otkinutih s radnih površina dijelova tribosustava kao rezultat djelovanja procesa trošenja. Ova tehnika je uspješno korištena za dijagnozu stanja motora vojnih aviona.

Ferografija je najmoćniji alat za dijagnozu stanja stroja analizom ulja. Testiranje je dugačko i zahtjeva određene vještine ljudi koji ju koriste. Metoda je jako skupa, ali zbog dobivenih rezultata, koji su izuzetno korisni za održavanje stroja se višestruko isplati.

Ferografska metoda se potvrdila kao uspješna tehnika za nadgledanje stanja zatvorenih sustava (motora).

2.1. ANALITIČKA FEROGRAFIJA

Analitička ferografija omogućava vizualno ispitivanje čestica istrošenja prisutnih u uzorku ulja. Za stvaranje ferograma koristi se razrijeđeni uzorak ulja koji prolazi preko staklenog klizača ispod kojeg je magnetsko polje. Magnetsko polje privlači željezne čestice izvan ulja na površinu klizača. Željezne se čestice uzduž ferograma poredaju u redu od većih prema manjima. Neželjezne čestice mogu se lako razlikovati jer se raspoređuju svuda po ferogramu. Ferogram sadrži „blic snimak“ čestica trošenja prisutnih u sustavu u trenutku kada je uzorak ulja bio uzet. Koristeći bikromatski mikroskop pri povećanju od 100, 500 ili 1000 puta, pod izravnim i reflektirajućim svjetlom, operator analize prepoznaje i klasificira čestice u skladu s njihovim svojstvima (veličini, obliku, boji, površinskim izgledom, magnetizmom itd.). [3]

Obučeni i iskusni operator analize može razlikovati čestice nastale abrazivnim djelovanjem od čestica nastalih kad se površine kotrljaju jedna po drugoj (kao što su kotrljajući dijelovi kotrljajućih ležajeva) i tako otkriti vrstu trošenja nastalog u sustavu, kao i uzrok takvom trošenju. Korištena u kombinaciji sa spektroskopskim analizama ulja ferografija kompletira sliku o stanju trošenja u sustavu.

2.2. FEROGRAFIJA IZRAVNIM OČITAVANJEM

Ferografija izravnim očitavanjem daje izravne izmjere količine čestica trošenja prisutnih u uzorku ulja. Ferograf izravnog očitavanja je mikroprocesorsko/optički instrument koji mjeri veličinu čestica trošenja u uzorku ulja. Čestice trošenja su podijeljene u dvije

kategorije. Velike čestice (DL) koje su veće od 15 mikrometara i predstavljaju čestice abnormalnog trošenja, te male čestice (DS) koje su manje od 15 mikrometara, i predstavljaju čestice normalnog trošenja. [2]

Uzorak ulja se provodi kroz taložnu cijev koja leži u magnetskom polju. Veće čestice u ulju su jače privučene i talože se na ulazu u taložnu cijev, a manje čestice, koje magnetsko polje slabije privlači, talože se proporcionalno njihovoj veličini uzduž taložne cijevi. Nemagnetske čestice kao što su aluminij, mjed i bijeli metal veličinom su manje selektivne. Veće čestice nemagnetskih metala mogu se pronaći svugdje uzduž cijevi.

Mjereći intenzitet prolaza svjetla kroz taložnu cijev, koristeći optička vlakna, ustanovljuje se količina malih i velikih čestica trošenja. Omjer između očitanoj sadržaja velikih (DL) i malih (DS) čestica otkriva tijekom vremena promjene u načinu trošenja sustava. Na primjer: tendencija povećanja broja velikih čestica trošenja pokazuje da se sustav nalazi u radnom stanju s abnormalnim trošenjem. Tendencija povećanja broja malih čestica trošenja može ukazati na povećanje korozije u sustavu (veličina čestica trošenja zbog korozije je manja od 3 mikrometra).

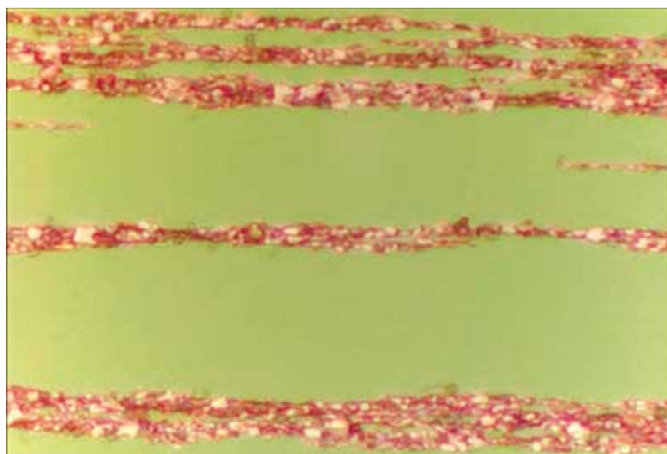
Izravnim očitavanjem rezultata ferografije ustanovljuje se stanje trošenja u sustavu podmazivanom uljem. Kad se abnormalno trošenje otkrije, za detaljnu analizu koristi se analitička ferografija.

2.3. KARAKTERISTIČNE ČESTICE TROŠENJA KOJE SE MOGU OTKRITI FEROGRAFIJOM

Postoji nekoliko karakterističnih tipova trošenja koja se mogu otkriti analitičkom ferografijom, što omogućuje ključna saznanja o normalnom i abnormalnom trošenju stroja ili motora. Šest najčešćih vrsta čestica uključuju sljedeće: [5]

2.3.1. NORMALNE ČESTICE USLIJED TROŠENJA STRUGANJEM

Pojavljaju se stalno, sa sporim i stabilnim ritmom, kao posljedica normalnog rada motora. Takve čestice su obično male, pločastog oblika, veličine 5-10 mikrometara i debljine 1 mikrometar ili manje. Imaju vrlo malu ili nevidljivu površinsku hrapavost. Kako radni parametri motora postaju teži tako metalne čestice bivaju većih dimenzija i oksidiraju. Konačno, neposredno prije kvara, stvaraju se velike metalne čestice kao posljedica jakog trošenja. [5]



Slika 2.1 Normalne čestice uslijed trošenja struganjem [4]

2.3.2. REZNE ILI ABRAZIVNE ČESTICE TROŠENJA

Rezultat su prodiranja jedne površine u drugu. Ovakve čestice imaju oblik tankih do debelih kovrčavih strugotina, željeznih i neželjeznih materijala. Nastaju na dva načina:

Prvi je kada tvrda komponenta postane ekscentrična ili napukne, pa tvrdim i oštrim krajem prodire u mekšu površinu. Tada nastaju grube i velike čestice trošenja, prosječno 2-10 mikrometara široke i 25-100 mikrometara duge.

Drugi je kad se abrazivne čestice iz kontaminiranog ulja utisnu u meku kliznu površinu olovne ili kositrene legure ležajeva. One tad strše iz meke površine i zadiru u suprotnu kliznu površinu, što stvara vrlo fine čestice, žičanog oblika, debljine oko 0,25 mikrometara. Bilo koji znak reznog ili abrazivnog trošenja ukazuje na abnormalnu situaciju. Čestice veće širine i dužine su i indikacija ozbiljnog kvara ili poremećaja u motoru. [5]



Slika 2.2 Rezne ili abrazivne čestice trošenja [4]

2.3.3. SFERNE ČESTICE TROŠENJA

Nastaju zbog umora materijala ležaja. Zamor materijala kotrljajućih ležajeva nije jedini izvor sfernih metalnih čestica. Zavarivanje, brušenje ili pjeskarenje stvaraju ih također. Samo malobrojne sferne čestice kotrljajućih ležajeva su promjera većeg od 15 mikrometara, dok su čestice od zavarivanja, pjeskarenja i brušenja promjera većeg od 20 mikrometara. Sferne čestice, prouzročene nekim vanjskim procesom najčešće su krupne, grube i oksidirane. [5]



Slika 2.3 Sferne čestice trošenja [3]

2.3.4. ČESTICE TROŠENJA TEŠKOG KLIZANJA

One su pokazatelj prekomjernog opterećenja na površinama u kontaktu. Ove čestice su duge i plitke, a njihove klizne istrugane pruge čine ih lako prepoznatljivima. Veličina čestica je veća od 30 mikrometara i ponekad se pojavljuju miješanih boja zbog ekstremne temperature i tlaka koji su u svezi s njihovim nastajanjem. [5]



Slika 2.4 Čestice trošenja teškog klizanja [6]

2.3.5. LAMELASTE ČESTICE TROŠENJA

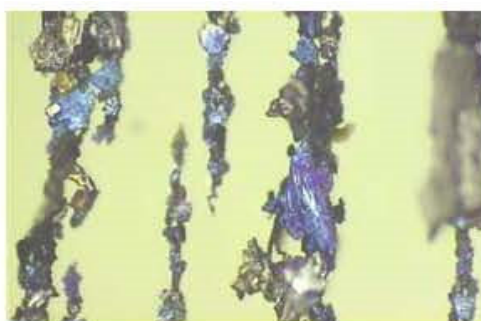
Nastaju prolaskom čestica trošenja između površina kotrljajućih elemenata. Mogu nastati zbog zamora materijala, prekomjernog opterećenja, nedovoljnog podmazivanja ili kontaminiranosti ulja. Čestice se spljošte, krajevi im se odvoje i napuknu, te formiraju rupu u materijalu. Veličina čestica može varirati između 15 i 500 mikrometara. Ležaj redovito stvara pločaste čestice tijekom radnog vijeka, ali zbog zamora materijala ova se pojava povećava. Povećanje količine lamelastih čestica u dodatku sa sferičnim česticama ukazuje na zamor materijala kotrljajućeg ležaja. [5]



Slika 2.5 Lamelaste čestice trošenja [6]

2.3.6. ČESTICE TROŠENJA ZUPČANIKA

Imaju dva primarna mehanizma nastajanja. Povezana su struganjem i zamorom materijala na dodirnoj površini zuba. Ove čestice su slične onima koje se pojavljuju zbog zamora materijala kotrljajućih ležaja. Obično imaju plosnatu površinu i nepravilan oblik. Rezultat su naprezanja na površini zuba koja uzrokuju puknuća koja se šire dublje u zub zupčanika prije odlomljivanja čestice. Ove čestice naginju hrapavoj površini i rogatim krajevima. Neke od većih čestica imaju pruge na njihovim površinama otkrivajući tako klizni kontakt. [5]



Slika 2.6 Čestice trošenja zupčanika [4]

2.4. FEROGRAFIJA JUČER I DANAS

Ferografija kao analitička metoda za odvajanje i određivanje sadržaja željeznih čestica uvedena je u praksu sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Ova analitička metoda je bila podjednako zanimljiva inženjerima koji se bave podmazivanjem i trošenjem metala, ali i znanstvenicima na području medicine. Prvi instrumenti za ferografiju bili su u mogućnosti iz mazivog ulja, ili druge tekućine, utjecajem magnetskog polja odvojiti željezne čestice veličine od 20 nanometara pa sve do nekoliko mikrometara. Utvrđivanje količine i veličine metalnih čestica u rabljenom motornom ulju dalo je odgovore na brojna pitanja i potaklo daljnja istraživanja i unapređivanja analitičkih tehnika na tom planu. Ferografija je tako omogućila:

- izdvajanje metalnih čestica i njihovo svrstavanje prema veličini
- osnovne informacije o četiri glavne karakteristike čelika – o količini, veličini, morfologiji i sastavu
- uvođenje novog morfološkog opisa čestica nastalih trošenjem metala i boljeg poznavanja načina i uzroka trošenja metala

Ferografija je dala posebno velik doprinos praćenju rada mlaznih motora, jer su rezultati dobiveni ispitivanjem magnetskih svojstava mazivog ulja dali znatno brže i točnije podatke od klasičnih analitičkih postupaka. Ferografski postupak se sastoji od pumpanja mazivog ulja koje se ispituje vrlo malom brzinom (obično oko 0,25 ml/s) u blizini vrlo jakog magnetskog polja, koje djeluje na metalne čestice i sakuplja ih na podesnom transparentnom nosaču. Razvoj ove metode je omogućio i izdvajanje metalnih čestica ne samo iz ulja za podmazivanje, nego i iz mazivih masti, ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem, pa čak i iz bioloških materijala. Utjecajem magnetskog polja se izdvojene čestice onda mogu na razne načine i koristeći razne tehničke postupke, dalje analizirati. Za to se koriste razne optičke tehnike, ali i spektrometrija za određivanje količine čestica. Spektrometrijske metode su dale uvid u sadržaj drugih metala u česticama, u prvom redu bakra, iz čega se moglo zaključiti koji su dijelovi motora u pojedinom slučaju najviše izloženi trošenju materijala. Na medicinskom planu su napredne ferografske metode dale uvid u ponašanje virusa u ljudskom organizmu, pa čak i u praćenje specifičnih bolesti kao što je AIDS. Razvoj ferografije kao analitičkog postupka, posebno unaprijeđenog primjenom kompjutera, dao je velik doprinos ne samo tehnici podmazivanja nego i mnogim drugim segmentima suvremene znanosti. [7]

3. METODE ODRŽAVANJA TEMELJENE NA KOLIČINI ČESTICA U LUBRIKANTIMA

Određivanje količine i vrste čestica je od velike važnosti za održavanje. Prema vrsti čestica u lubrikantima možemo odrediti u kakvom je stanju dio stroja koji ispituje. Stanje lubrikanta se najlakše određuje mjerući viskoznost, pH-vrijednost i bazni broj. Također postoje testovi kojima možemo utvrditi prisutnosti uljnih dodataka kao što su: dodaci protiv trošenja, dodaci protiv oksidacije, inhibitori korozije i tvari protiv pjenjenja te se testovima također može odrediti njihovo efikasno djelovanje. Komponente trošenja možemo odrediti mjerući količinu trošenih metala kao što su željezo, bakar, krom, aluminij, olovo, kositar i nikal. Povećanja određenog trošenja metala mogu značiti da se samo jedan određeni dio troši ili da se trošenje odvija u određenom dijelu stroja. Onečišćenja se određuju mjerenjem sadržaja vode, specifične gravitacije i udjela silicija. Prisutnost silicija ukazuje na onečišćenja od prljavštine. [8]

3.1. KARL FISCHER VODENI TEST

Karl Fischer vodeni test je metoda za određivanje sadržaja vlage. Metodu je razvio kemičar Karl Fischer. Voda ozbiljno šteti svojstvima lubrikanta i promiče koroziju. Povećana koncentracija vode povećava mogućnost kondenzacije. Zato je važno provesti ovaj test, te utvrditi količinu vode. Test se temelji se na reagensu koji reagira s vodom i pretvara vodu u nevodljivu kemikaliju. Test određuje količinu vode u lubrikantu. Postoje dvije metode koje se koriste u Karl Fischer testu, a to su volumetrijska i kulometrijska metoda. [9]

3.1.1. VOLUMETRIJSKA METODA

Ovom metodom se vlaga određuje količinom ili volumenom reagensa korištenog za pretvorbu vode. Metoda se koristi kada je udio vlage od 1% do 2%. Reagens se dodaje dok se sva voda ne pretvori, odnosno otkloni. Temelj Karl Fischer metode je reakcija između joda i vode. Reakcija mijenja konduktivnost uzorka koji sadrži vodu. Promjena konduktivnosti određuje kraj reakcije. Uzorci su otopljeni u otapalu prije nego li titranje počne. Otapalo je smješteno u zatvoreni spremnik ili titrajuću ćeliju, koja se sastoji od ulaza za uzorak, ulaza za uvođenje reagensa i miješalicu. [10]



Slika 3.1 Uređaj za provođenje volumetrijske metode [10]

Proces testiranja započinje sa uvođenjem uzorka koji se otapa u otapalu unutar titrajuće ćelije. Time se mijenja električna konduktivnost mješavine uzorka i otapala. Nakon toga slijedi dodavanje reagensa koji reagira s vodom da bi vratio konduktivnost na početno stanje. Količina vode/vlage u uzorku onda se određuje prema količini reagensa potrebnog da se dostigne početna konduktivnost.

3.1.2. KULOMETRIJSKA METODA

Kulometrijska Karl Fischer metoda se koristi za mjerenje malog sadržaja vlage. Uglavnom se koristi za uzorke koje sadrže manje od 1 % vlage i za uzorke koji se veličine manje od 200 milimetara. U ovoj metodi reagens i otapalo se nalaze zajedno u titrajućoj ćeliji. Kada se uzorak uvede u titrajuću ćeliju i otopi, reagens se otpušta indukcijom struje. Količina struje potrebne za pretvorbu vode je određena količinom vlage. Prednost kulometrijske Karl Fischer metode je sposobnost točnog mjerenja malih količina vlage. [11]

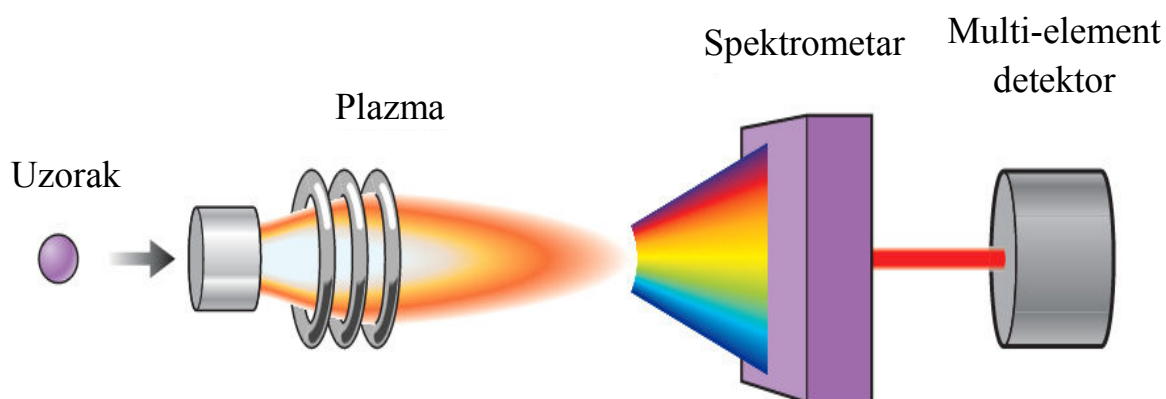


Slika 3.2 Uređaj za provođenje kulometrijske metode [11]

3.2. ICP SPEKTROSKOPIJA

ICP spektroskopija mjeri koncentraciju potrošenih metala, nečistoća metala i metalnih dodataka u lubrikantu. Dobivene informacije pomažu određivanju uljnog stanja i stanja stroja. ICP spektroskopija je jedna od najčešćih metoda za analizu čestice. Sve vrste otopljenih uzoraka mogu biti analizirane, varirajući od čestica koje sadrže veliku količinu soli do razrijeđenih kiselina. Plazma mlaz se koristi da bi rastavio uzorak na njegove sastavne atome ili ione, dovodeći ih na veću energijsku razinu. Uzorci se kasnije vraćaju svojem početnom stanju emitirajući fotone određenih valnih duljina ovisno o vrsti elementa. Svjetlo je evidentirano optičkim spektrometrom.

ICP plazma mlaz se koristi kako bi određeni elementi emitirali svjetlo, da bi nakon toga spektrometar razdvojio svjetlo na određene valne duljine.

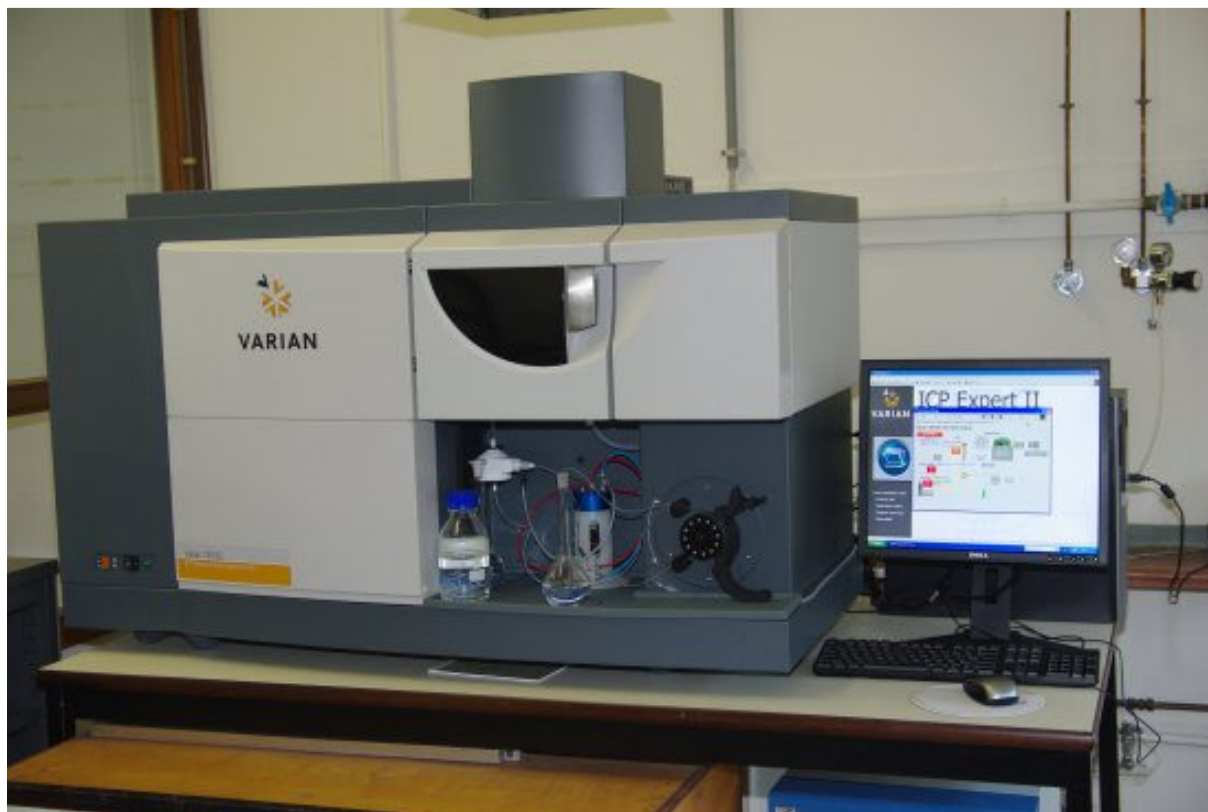


Slika 3.3 Princip ICP spektroskopije [12]

Atomska apsorpcijska spektroskopija je kvantitativna metoda za određivanje koncentracija pojedinih metala u otopini. Za atomiziranje uzorka najčešće se koristi plamen, iako su u upotrebi i druge metode kao npr. grafitna peć. Analizirani metal je potrebno prevesti u atomski oblik i to se postiže u 3 koraka:

- desolvacija - isparavanje otapala, ostatak je suhi plin
- vaporizacija - suhi, kruti uzorak se pretvara u plin
- volatizacija - komponente koje tvore uzorak prevode se u slobodne atome

Svjetlost koja je usmjerena na plamen nastaje u lampi. Unutar lampe nalazi se katoda od metala koji se pobuđuje te anoda. Atomi metala u katodi pobuđuju se visokim naponom te emitiraju svjetlost točno određenog spektra. Tip lampe ovisi o analiziranom uzorku, npr. ako želimo odrediti koncentraciju bakra u otopini koristiti ćemo bakrenu katodu. [12]



Slika 3.4 Uređaj za provođenje ICP spektroskopije [13]

Uzorak se atomizira u plamenu kroz koji prolazi svjetlost na putu prema detektoru. Elektroni analiziranog metala mogu se pobuditi apsorpiranjem točno određenih paketa energije (kvanti) karakterističnih za pojedine elektronske prijelaze. Količina energije koja ulazi u plamen je poznata, a ona koja izlazi bilježi se detektorom. Na osnovu toga moguće je izračunati koliko se elektronskih prijelaza dogodilo pri prolasku kroz analizirani uzorak, tj. moguće je odrediti koncentraciju analiziranog metala.

3.2.1. ICP-AES

ICP-AES je emisijska spektrofotometrijska tehnika temeljena na činjenici da pobuđeni elektroni pri povratku u osnovno stanje emitiraju energiju točno određene valne duljine. Osnovna karakteristika ovog procesa je da svaki element emitira zračenje određene valne duljine. Iako svaki element emitira „smjesu“ valnih duljina u ICP-AES tehnici izdvaja se 1 ili manji broj specifičnih valnih duljina za dani element. Intenzitet emitirane energije na odabranoj valnoj duljini proporcionalan je koncentraciji elementa u analiziranom uzorku. Dakle, određivanjem valnih duljina koje emitira analizirani uzorak te njihovog intenziteta dobivamo kvalitativni i kvantitativni sastav uzorka.

Glavni dijelovi svakog ICP-AES su:

- sustav za uvođenje uzorka
- sustav za sagorijevanje
- spektrometar

Tekući uzorak se pumpa u raspršivač uz pomoć peristaltičke pumpe. Raspršivač stvara aerosol te ubrizgava plinoviti argon u komoru. Aerosol s uzorkom i argonom injektira se u plazmu u sustavu za sagorijevanje. Plazma s temperaturom reda veličine 10^4K pobuđuje elektrone. Kada se elektroni vraćaju u osnovno stanje emitiraju specifične valne duljine karakteristične za sastav analiziranog uzorka.

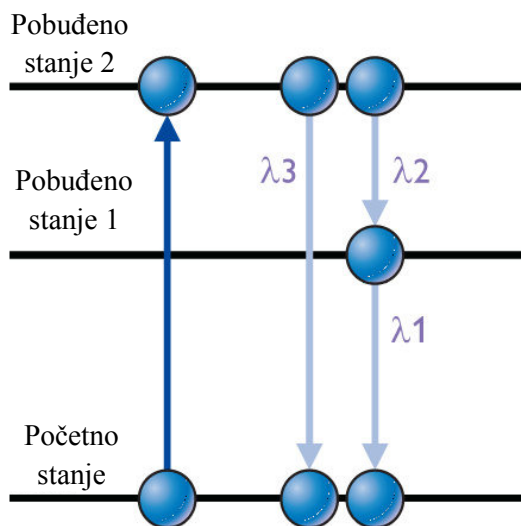
3.2.2. OPIS UZORKA

Uzorak u krutom stanju se prvo otapa i miješa sa vodom. Dalje se uzorak pretvara u aerosol, a to su koloidno raspršene čvrste ili tekuće čestice u plinu kao magla ili dim. Veće kapljice su odvojene od najmanjih u posebnoj mlaznoj komori. Najmanje kapljice (1-10 mikrometara) su premještene strujanjem argona u argon plazmu. Najveće kapljice se izbacuju.

3.2.3. PLAZMA

Da bi proizveli jaku atomsku emisiju svih kemijskih elemenata potrebno je postići temperaturu koja je značajno iznad temperature običnog plamena. Najveća vrijednost atomske emisije je postignuta na temperaturama između 7 000 K i 10 000 K. Da bi se postigla i održavala tako velika temperatura potrebno je proizvesti plazmin mlaz od inertnog plina. Plazma je plinovito stanje tvari koja se sadrži od osnovnih slobodnih elektrona i visoko nabijenih iona. Ona je jako efektivan medij za volatilizaciju, atomizaciju i ionizaciju tekućih kapljica. Kada aerosolne kapljice uđu u vrući prostor plazme pretvaraju se u suhe, slane čestice procesom desolvacije. Te suhe, slane čestice su podijeljene u pojedinačne molekule koje će se kasnije raspasti na atome i ione. Većina elemenata se ionizira učinkovito (>90%).

U plazmi se još više energije prenosi atomima i ionima, promicanjem pobuđenja njihovih elektrona na višu energijsku razinu. Kada se ti pobuđeni atomi i ioni vrate na svoje početno stanje ili niže pobuđeno stanje oni će emitirati elektromagnetsko zračenje u ultraljubičastom vidljivom spektru. Svaki pobuđeni element emitira određenu valnu duljinu. Intenzitet zračenja je proporcionalan koncentraciji elementa, čestice.



Slika 3.5 Valne duljine pobuđenih stanja [12]

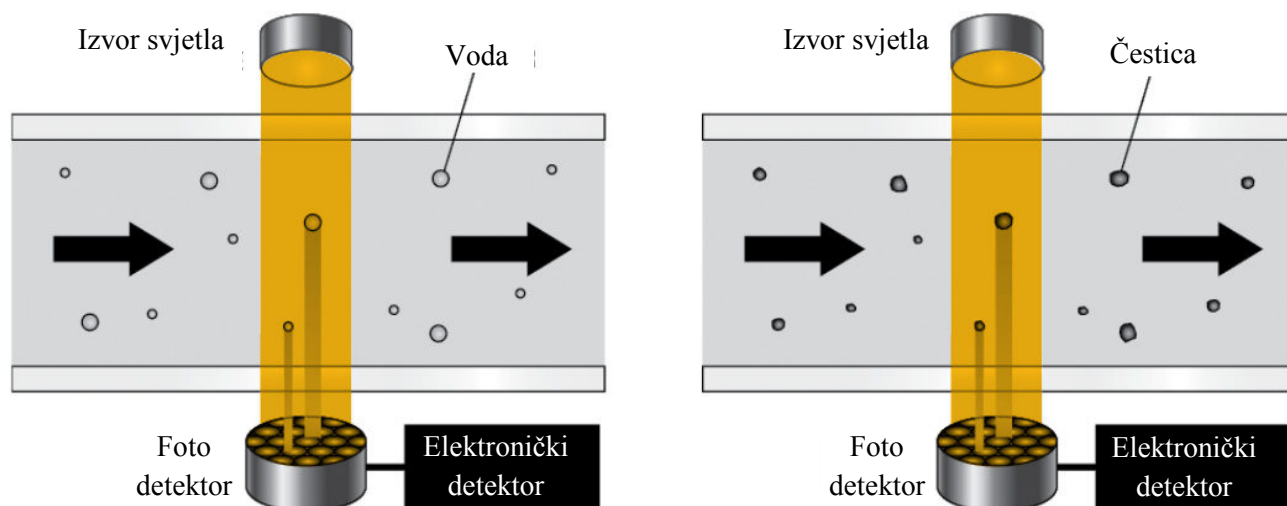
3.3. BROJAČ ČESTICA

Brojač čestica je metoda koja mjeri veličinu i količinu čestica u lubrikantu. Može kvantificirati broj čestica od 4 mikrona do 50 mikrona, bez obzira na sastav čestice. Ova analiza se mjeri u česticama po milimetru. Nečistoća, metal i voda će biti prikazani kao čestice u ovoj analizi jer brojač čestica ne razlikuje sastav čestica. Može i otkriti dodatne znakove abnormalnog trošenja. Uz ovu metodu se koristi i metoda analize elemenata koja otkriva kakav je sastav čestice. Prednost ove metode je što može mjeriti sve čestice, bilo da se radi o metalima, vlaknima, nečistoćama... [14]

3.3.1. TEHNIKE BROJANJA ČESTICA

Najizravnija metoda mjerenja većih čestica je optički mikroskop. Sa ovom metodom izmjerena količina ulja prolazi kroz dio za filtraciju koji zadržava čestice. Tada tehničar broji i mjeri veličinu svake čestice na filteru. Brojanje i mjerenje veličine čestica se radi pomoću kalibriranog mikroskopa. Ova tehnika mjerenja pomoću optičkog mikroskopa dugo traje i jako je skupa.

Optički brojač čestica je izumljen kako bi smanjio troškove i potrebno vrijeme za brojanje čestica. A princip rada je da instrument isijava laser koji prolazi kroz uzorak. Detektor tada broji i ustanovljuje veličinu sjena stvorenih od čestica u ulju. Svaki predmet u ulju koji stvara sjenu se broji kao čestica. Kapljice vode, zračni mjehurići i uljni dodaci će također napraviti sjenu. Mjerenje vode, zraka i dodataka brojačem čestica se naziva interferencija. Optički brojač čestica ne može raspoznati razliku između sjena prouzročenih dijelovima i sjena prouzročenih interferencijom, zato je potrebno oprezno pripremiti uzorak.



Slika 3.6 Princip brojanja čestica [15]

Uzorci koji sadrže više od 0,5% onečišćene vode se ne bi trebali testirati sa optičkim brojačem čestica. Zračni mjehurići također proizvode sjene tijekom analize i brojač čestica ih broji kao česticu. Uzorci boca se mogu vakumizirati prije analize kako bi otklonili mjehuriće. Uljni dodaci su najčešći problem kod novih ulja. Kada se ulje jednom stavi u uporabu nekoliko sati, dodaci se smanjuju. Problem nije isti kod svih novih ulja. Količina i vrsta uljnih dodataka će utjecati na jačinu interferencije. Jako kvalitetna motorna ulja sadrže najveću količinu dodataka. Zaključak je da treba koristiti uzorke koji imaju malu količinu vodenih i zračnih mjehurića te uljnih dodataka kako bi se analizom dobili što točniji rezultati. [15]

3.3.2. ANALIZA RJEŠENJA DOBIVENIH BROJAČEM ČESTICA

Brojač čestica daje izvještaj o broju i veličini čestica koje se nalaze u volumenu fluida. Instrument je podešen da raspoznaje različite veličine čestica. Rezultati su podijeljeni u raspon veličine ili „kanalima“ koji se odnose na određenu veličinu čestice. Na slici su prikazani rezultati mjerenja uzorka koji pokazuju tipični niz kanala i veličine čestica po milimetru.

Tablica 3.1 Broj čestica određenih veličina

VELIČINA (U MIKRONIMA)	4	6	10	14	18	21	38	50
BROJ ČESTICA	26650	9108	4016	1750	740	467	50	16

Slika pokazuje da se ovaj uzorak sastoji od 26 650 čestica većih od 4 mikrona, 9 108 čestica većih od 6 mikrona, 16 čestica većih od 50 mikrona...

Uspoređujući ove rezultate sa novijim rezultatima istog dijela, promjene u broju čestica mogu ukazati na abnormalno trošenje. Analiza elemenata dalje utvrđuje sastav tih čestica i ukazuje na vjerojatni uzrok trošenja. [15]

3.3.3. PRETVARANJE BROJA ČESTICA U ISO KOD

ISO kodovi su jednostavan način za kvantifikaciju određene tvari po veličini. Oni su najšire upotrebljena metoda za izvještavanje rezultata brojanja čestica. ISO kod sustav ima 28 brojeva, a svaki predstavlja određeni raspon čestica po milimetru. Najmanji broj čestica po milimetru u uzorku je 0,01, a najveći broj je 2 500 000.

3.4. TEST VISKOZNOSTI

Test viskoznosti predstavlja metode mjerenja otpornosti lubrikanta prema tečenju na određenoj temperaturi. Viskoznost je najvažnije fizičko svojstvo ulja. Testiranje viskoznosti se većinom provodi na korištenim uljnim uzorcima kako bi otkrili razinu čvrstoće i tečenja ulja. Viskoznost lubrikanta je od kritične važnosti za strojeve, jer osigurava da se metalne komponente ne troše jedna o drugu. Viskoznost lubrikanata se obično mjere i određuju na dva načina, ili bazirana na njihovu kinematičku viskoznost ili apsolutnu(dinamičku) viskoznost. Mada se čini da su ove dvije viskoznosti slične, postoji važna razlika između njih. Kinematička viskoznost ulja je definirana kao njegova otpornost prema tečenju i opiranju gravitaciji. Na primjer ako punimo posudu sa uljem i sa vodom, brže će teći voda od ulja, a to je zbog kinematičke viskoznosti. Apsolutna viskoznost je otpornost fluida miješanju, tj. prikazuje silu koja je potrebna da se uspostavi miješanje, stoga je potrebna manja sila za miješanje vode nego ulja. U ovom primjeru su kinematička i apsolutna viskoznost veća u ulju nego u vodi, ali ne moraju uvijek biti povezane, u nekim primjerima je jedna veća a druga manja. [16]

3.4.1. METODA TESTIRANJA VISKOZNOSTI VISKOMETROM S KAPILARNOM CIJEVI

Najčešća metoda određivanja kinematičke viskoznosti u laboratoriju koristi viskometar sa kapilarnom cijevi. U ovoj metodi, uzorak ulja je smješten u staklenu kapilarnu cijev. U-cijev se zajedno sa uzorkom usisava kroz cijev dok ne postigne početnu poziciju prikazanu na strani cijevi. Tada prestaje usisavanje, što omogućuje uzorku da poteče natrag kroz cijev uslijed djelovanja gravitacije. Uski kapilarni dio cijevi kontrolira i određuje stupanj tečenja ulja; veći stupanj viskoznosti ulja znači da će dulje teći nego ulja s nižim stupnjem viskoznosti.

Stupanj tečenja je ovisan o otporu ulja prema tečenju uslijed gravitacije kroz kapilarnu cijev, pa ovaj test zapravo mjeri kinematičku viskoznost ulja. Vrijednost viskoznosti se prikazuje preko centistokesa (cSt) koji odgovara milimetru kvadratnom po sekundi i izračunava se kao vrijeme potrebno da ulje proteče od početne točke do zaustavne točke koristeći stalnu kalibraciju svake cijevi.



Slika 3.7 Uredaj za testiranje viskoznosti [16]

Rezultati viskoznosti ulja su neupotrebljivi ako nije definirana temperatura na kojoj je viskoznost mjerena. U pravilu se viskoznost mjeri na jednoj do sljedeće dvije temperature, ili na 40°C ili na 100°C. Za većinu industrijskih ulja, kinematička viskoznost se mjeri na 40°C zato jer tu temperaturu koristi ISO sustav za ocjenjivanje viskoznosti. Dok se većina motornih ulja mjeri na 100°C zato jer tu temperaturu koristi SAE sustav za klasifikaciju ulja.

Tablica 3.2 ISO i SAE sustav ocjenjivanja viskoznosti

ISO VG ocjena	Srednja viskoznost pri 40°C/cSt	Minimalna viskoznost pri 40°C/cSt	Maksimalna viskoznost pri 40°C/cSt	SAE ocjena viskoznosti	Minimalna viskoznost pri 100°C/cSt	Maksimalna viskoznost pri 100°C/cSt
15	15,0	13,5	16,5	-	-	-
22	22,0	19,8	24,2	-	-	-
32	32,0	28,8	35,2	-	-	-
46	46,0	41,4	50,6	-	-	-
68	68,0	61,2	74,8	20	5,6	9,3
100	100,0	90,0	110,0	30	9,3	12,5
150	150,0	135,0	165,0	40	12,5	16,5
220	220,0	198,0	242,0	50	16,3	21,9
320	320,0	288,0	352,0	-	-	-
460	460,0	414,0	506,0	-	-	-
680	680,0	612,0	748,0	-	-	-

3.4.2. METODA TESTIRANJA OKRETNIM VISKOMETROM

Metoda određivanja viskoznosti koja koristi okretni viskometar rjeđe se primjenjuje. U ovoj metodi ulje je smješteno u staklenu cijev koja se nalazi u izoliranom dijelu na stalnoj temperaturi. Metalno vreteno se okreće stalnom okretnom brzinom u ulju te se mjeri potreban moment za rotaciju vretena. Na temelju unutrašnje otpornosti rotaciji uzrokovanoj smičnim naprežanjem ulja, određuje se apsolutna viskoznost ulja. Apsolutna viskoznost se izražava u centipoisima, koji odgovaraju mPa*s. [16]



Slika 3.8 Uređaj za mjerenje viskoznosti sa okretnim viskometrom [16]

3.5. INFRACRVENA SPEKTROSKOPIJA S FOURIEROVOM TRANSFORMACIJOM

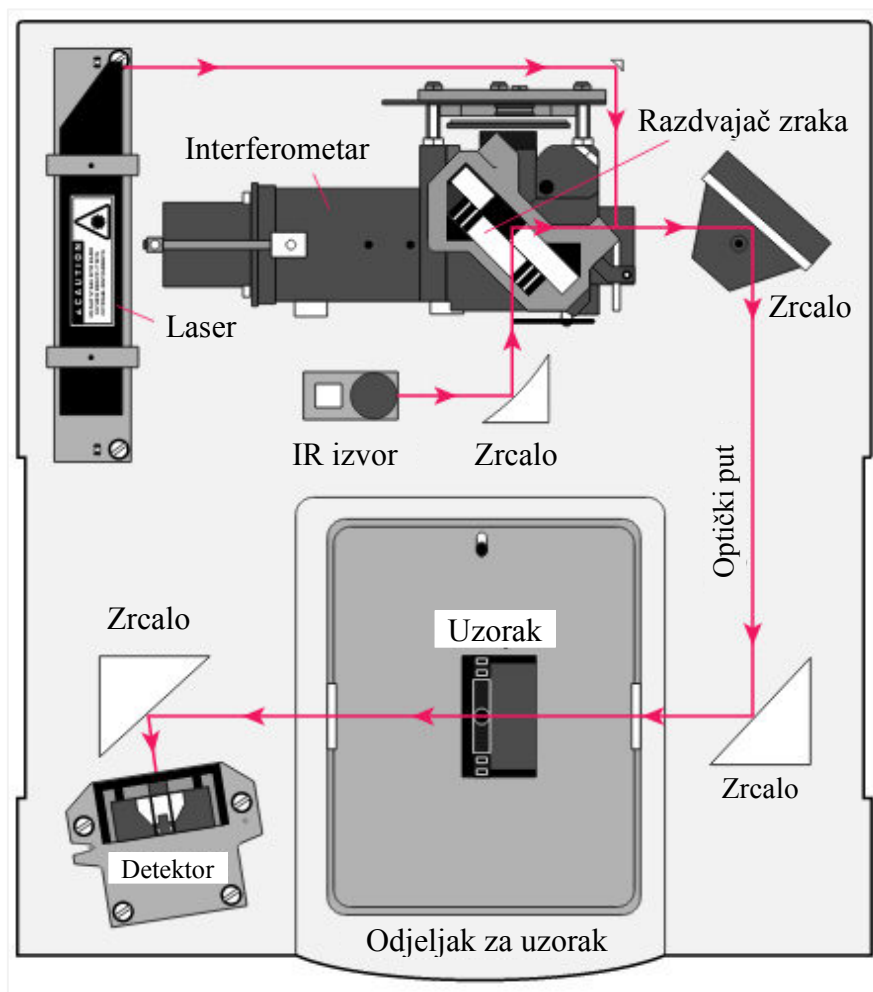
U ovoj metodi se koriste infracrvene zrake koje ili uzorak apsorbira ili prolaze kroz uzorak. Rezultirajući spektar predstavlja molekularnu apsorpciju i transmisiju odnosno prijenos, stvarajući molekularni otisak uzorka. Kao i otisak prsta ne postoje dvije molekularne strukture koje proizvode isti infracrveni spektar, što čini infracrvenu spektroskopiju korisnu za nekoliko vrsta analiza.

Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom može:

- identificirati nepoznate materijale
- odrediti kvalitetu ili postojanost uzorka
- odrediti količinu komponenata u mješavini

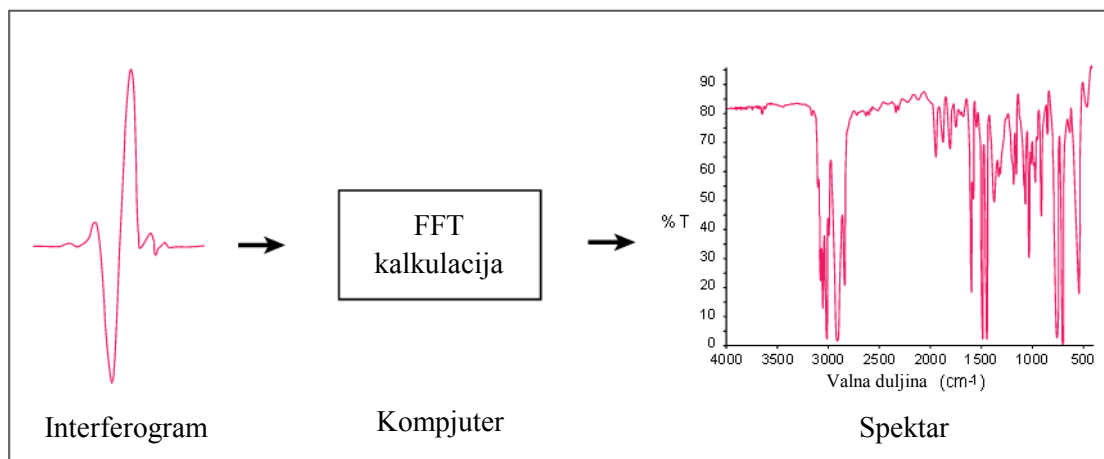
Metoda je razvijena kako bi prevladala ograničenja koja sadrže disperzivni instrumenti. Glavni problem je bio sporo skeniranje procesa. Stoga je napravljen jako jednostavan optički uređaj, interferometar. Interferometar proizvodni jedinstvenu vrstu signala koji ima sve infracrvene frekvencije zapisane u sebi. Signal se može mjeriti jako brzo, obično u jednoj sekundi. Većina interferometara sadrži razdvajač zraka koji prima ulaznu infracrvenu zraku i razdvaja ju u dvije optičke zrake. Jedna zraka se reflektira od ravnog zrcala koje je fiksirano u mjestu, a druga zraka se reflektira od ravnog zrcala koje je na

mehanizmu koji dozvoljava tom zrcalu da se pomiče po kratkoj udaljenosti(par milimetara) od razdvajaa zraka. Zbog toga što je put jedne zrake koje prolazi konstantne duljine, a druge se konstantno mijenja kako se zrcalo pomiče, signal koji izlazi iz interferometra je rezultat djelovanja između te dvije zrake. Rezultirajući signal se zove interferogram i ima jedinstveno svojstvo da svaki podatak zrake koji tvori signal ima informacije o svakoj infracrvenoj frekvenciji koja dolazi iz izvora. To znači kada je interferogram mjereno, sve frekvencije se istovremeno izmjere, što dovodi do ekstremno brzih vremena mjerenja. [17]



Slika 3.9 Sastavnica IC-FT-a [17]

U ovoj metodi se zahtjeva sredstvo za dekodiranje pojedinih frekvencija. Taj zahtjev se rješava uporabom dobro poznate matematičke tehnike zvane Fourierova transformacija. Ova transformacija je izvedena pomoću kompjutera koji prikazuje korisniku željeni spektar podataka potrebnih za analizu.

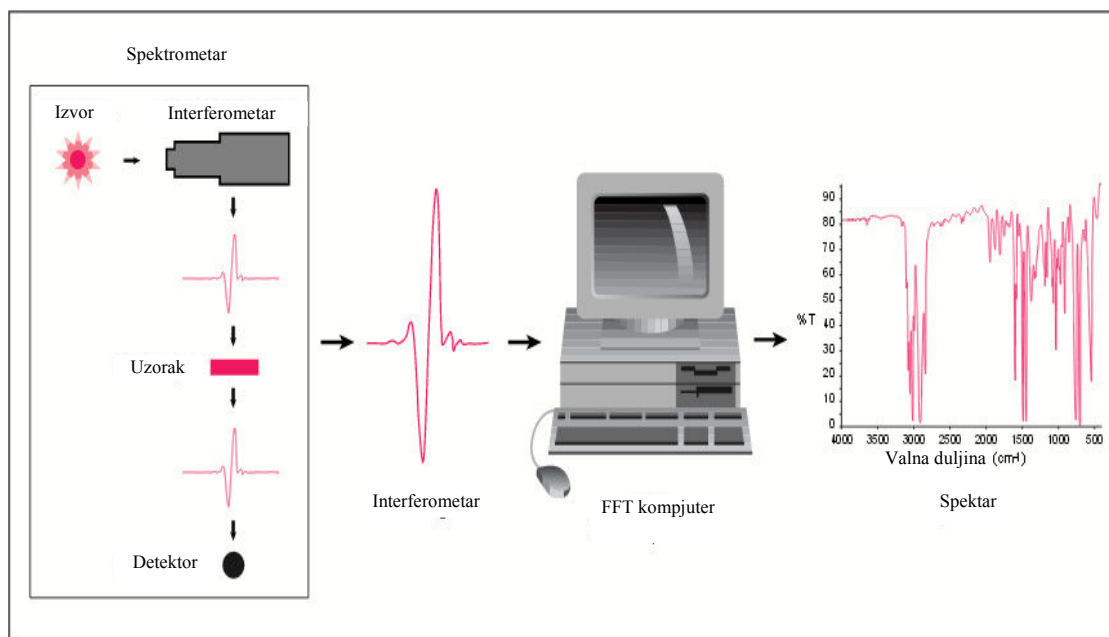


Slika 3.10 Primjer Fourierove transformacije [17]

3.5.1. INSTRUMENTI POTREBNI ZA PROVEDBU TESTIRANJA

Potrebni su sljedeći instrumenti:

1. IZVOR – infracrvene zrake se emitiraju iz izvora u obliku crnog užarenog dijela. Te zrake prolaze kroz dio koji kontrolira količinu energije predanu uzorku, te dalje detektoru.
2. INTERFEROMETAR – zraka ulazi u interferometar gdje se dekodiranje spektra odvija. Rezultirajući signal interferograma tada izlazi iz interferometra.
3. UZORAK - zraka ulazi u uzorak te prolazi kroz njega ili se reflektira od površine uzorka, ovisno o vrsti analize koja se provodi. To je mjesto gdje se specifične frekvencije energije, koje su jedinstvene karakteristike uzorka, apsorbiraju.
4. DETEKTOR – zraka napokon dolazi do detektora na završno mjerenje. Detektori su specijalno izrađeni za mjerenje specijalnog interferogramskog signala
5. KOMPJUTER – izmjereni signal se digitalizira i šalje na računalo gdje se odvija Fourierova transformacija. Konačni infracrveni spektar se tada prikazuje korisniku koji ga koristi za interpretaciju i bilo kakvu daljnju uporabu. [17]



Slika 3.11 Princip IC-FT-a [17]

Zbog potrebe o relativnoj skali za intenzitet apsorpcije, osnovni spektar mora biti izmjeren. On se obično mjeri bez uzorka, te se uspoređuje sa mjerenjem koji je imao uzorak kako bi se odredio postotak prozračnosti.

Prednosti infracrvene spektroskopije s Fourierovom transformacijom su sljedeće:

- BRZINA – zato jer se sve frekvencije mjere istovremeno, te se sva mjerenja ovom metodom odvijaju u sekundama
- OSJETLJIVOST – osjetljivost se značajno poboljšava sa uporabom FT-IR-a. Detektori koji su koriste si puno osjetljiviji, optička propusnost je mnogo veća što dosta smanjuje razinu buke
- MEHANIČKA JEDNOSTAVNOST – pokretno zrcalo u interferometru je jedini pokretljivi dio u instrumentu, pa je mogućnost kvara jako mala
- KALIBRACIJA – instrumenti se automatski kalibriraju i ne trebaju više nikad biti kalibrirani od strane korisnika

Zbog svih ovih prednosti, mjerenja sa FT-IR-om su jako precizna i izvodljiva. Metoda je pogodna za identifikaciju bilo kojeg uzorka. Velika osjetljivost omogućuje identifikaciju čak i najmanjih čestica i nečistoća. [17]

3.6. UKUPNI KISELINSKI BROJ

Test ukupnog kiselinskog broja je jedna od metoda u analiziranju ulja koja se upotrebljava za procjenu količine osiromašenih aditiva, kiselinskih čestica i oksidacije. Kiselinski broj ne mjeri izravno razinu oksidacije, nego mjeri nuspojave oksidacije. Također je koristan za određivanje razine osiromašenosti određenih aditiva.

Kiselinski broj predstavlja masu kalijeva hidroksida potrebnu za neutralizaciju 1 g uljnog uzorka, izražene u miligramima. Standardna jedinica kiselinskog broja je KOH/g. On ne predstavlja apsolutnu koncentraciju kiselina u uljnom uzorku. Otkriva i slabe organske kiseline i jake anorganske kiseline. Promjena koncentracije kiseline u ulju može nastati iz više izvora. Kiselinske čestice, pogrešno ulje, oksidacijske nuspojave mogu uzrokovati povećanje koncentracije kiseline.

Postupak započinje tako da se uzorak razrjeđuje razrjeđivačem i alkalnom bazom, u obliku kalijevog hidroksida i dodaje u kontroliranoj mjeri iz epruvete dok se uzorak ne neutralizira. Neutralizacija se mjeri jedinicom volt ili pH faktorom. Točka početka neutralizacije se kreće oko vrijednosti faktora pH 11. Ukupni kiselinski broj se određuje na temelju utrošene količine KOH potrebne za neutralizaciju. [18]

Jake kiseline imaju tendenciju postati korozivne i njihova se količina u mazivu mora obavezno kontrolirati. Kiselinski broj služi kao pokazatelj oksidacijske degradacije ulja tokom rada. Kada vrijednost ukupnog kiselinskog broja dosegne određenu definiranu vrijednost za ispitivano mazivo i njegovo mjesto primjene potrebno je izvršiti zamjenu ulja. Neočitavani porast vrijednosti ukupnog kiselinskog broja može upućivati na abnormalne radne uvjete (npr. pregrijavanje). Većina proizvođača maziva daje preporučene vrijednosti ukupnog kiselinskog broja u svojim katalozima. [19]



Slika 3.12 Uređaj za mjerenje ukupnog kiselinskog broja [18]

4. FEROGRAFSKI UREĐAJI [20]

Američka tvrtka TRICO je napravila sustav instrumenata, alata i opreme potrebne za provođenje ferografije. Sustav uključuje:

- Ferograf sa izravnim očitanjem DR-6
- Ferogram Maker FM-6
- Feroskop FS-6
- kompjuter
- veliki monitor
- softverski sustav za snimanje slika ispitivanog dijela
- jako kvalitetni laserski printer
- potreban pribor za 200 uzoraka
- internetska obrada podataka dobivenih mjerenjem i poduka za korištenje sustavom

4.1. FEROGRAF S IZRAVNIM OČITAVANJEM DR-6

DR-6 ferograf je uređaj koji se koristi za ispitivanje stanja čestica koje se nalaze u ulju. Kvantitativno mjeri koncentraciju potrošenih čestica u ulju te istovremeno prikazuje osnovne podatke o trošenju kako bi pomogao odrediti stanje dijela unutar minute.

DR-6 ferograf koristi puno učinkovitiji magnetski gradijent kako bi „zarobio“ i optički izmjerio količinu željeznih čestica. Instrument također utvrđuje osnovnu razinu trošenja za bilo koji dio opreme. Bilo kakvo iznenadno povećanje trošenja upozorava korisnika na potencijalne probleme, te ukazuje da su potrebne određene preventivne radnje. DR-6 ferograf sadrži mali monitor sa touch screen-om gdje se prikazuju rezultati mjerenje.



Slika 4.1 DR-6 ferograf [20]

Tablica 4.1 Karakteristike DR.6 ferografa

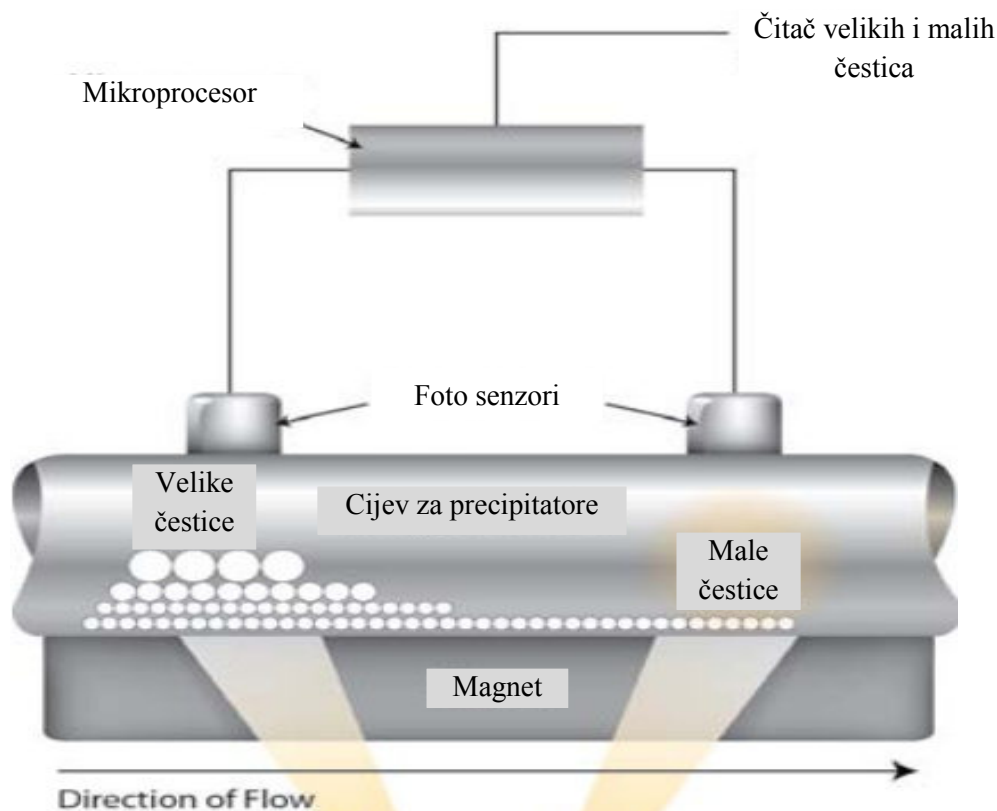
KARAKTERISTIKE DR-6 FEROGRAFA	
DULJINA	30,48 cm
ŠIRINA	27,305 cm
VISINA	54,61 cm
TEŽINA	5,9 kg
SNAGA	100-240V 50/60 Hz
PRIKLJUČCI	4 x USB „A“
OPERACIJSKI SUSTAV	Windows 7
MEMORIJA	16 GB

4.1.1. PRINCIP RADA

Ferograf sa izravnim očitanjem DR-6 radi na način da lubrikant, odnosno čestice u ulju teku kroz cijev na koju djeluje jaki magnet. Velike potrošene čestice u lubrikantu se jako brzo privuku magnetom, dok se male čestice skupljaju na izlaznom kraju magneta. Svjetlost se tada emitira kroz uzorak, a na drugom kraju foto senzori mjere količinu svjetlosti koja prolazi kroz uzorak. Dobiveni rezultati su velike željezne čestice (DL) koje su veće od 15 mikrometara i male željezne čestice (DS) koje su manje od 15 mikrometara. Izmjerena količina velikih i malih željeznih čestica se koristi kao podloga pomoću koje ferograf određuje razinu trošenja čestica i dijela (WPC), postotak velikih čestica i indeks težine trošenja (WSI).

Prednosti DR-6 ferografa su:

- lako korištenje
- male dimenzije instrumente
- primjena najjačeg magneta koji postoji, a istovremeno težina nije velika
- rezultati se brzo dobivaju



Slika 4.2 Princip rada DR-6 ferografa [20]

4.2. FERROGRAM MAKER FM-6

Ferrogram Maker predstavlja prvi korak analitičke ferografije. Zbog veće produktivnosti FM-6 je konstruiran sa dvije nezavisne stanice tako da se dva uzorka mogu pripremati istovremeno.

Svaka stanica sadrži držač koji precizno pozicionira čestice pod blagim nagibom od magneta, te omogućuje česticama da se slažu od najveće do najmanje na supstratu koji se zove ferogram. Ovakav primjer slaganja omogućuje dobru razlučivost većih i manjih čestica što olakšava dijagnosticiranje potencijalnih trošenja. Ferogram se može pripremiti automatski, poluautomatski ili ručno po korisnikovim željama. Automatskom pripremom uzorak se slaže na ferogram pažljivo, kontroliranom brzinom. Na kraju ciklusa slaganja uzorka, ciklus pranja se automatski pokreće, te se vizualnim signalom prikazuje završetak. Poluautomatska i ručna priprema daje fleksibilnost korisniku, te on može odlučivati koje uzorke će kako pripremati.



Slika 4.3 Ferrogram maker FM-6 [20]

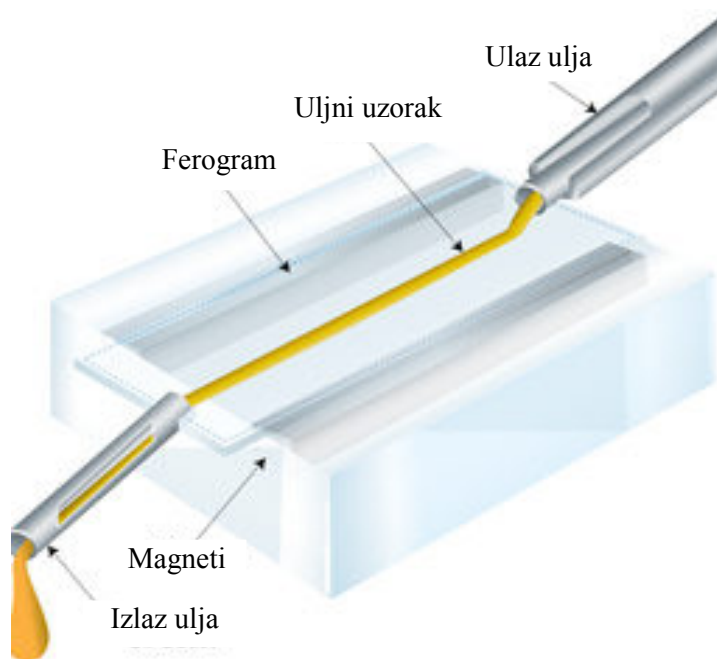
Tablica 4.2 Karakteristike FM-6

KARAKTERISTIKE FM-6	
DULJINA	40,64 cm
ŠIRINA	35,56 cm
VISINA	38,1 cm
TEŽINA	12,25 kg
SNAGA	100-240v 50/60 Hz
PRIKLJUČCI	4 x USB „A“
OPERACIJSKI SUSTAV	Windows 7
MEMORIJA	16 GB

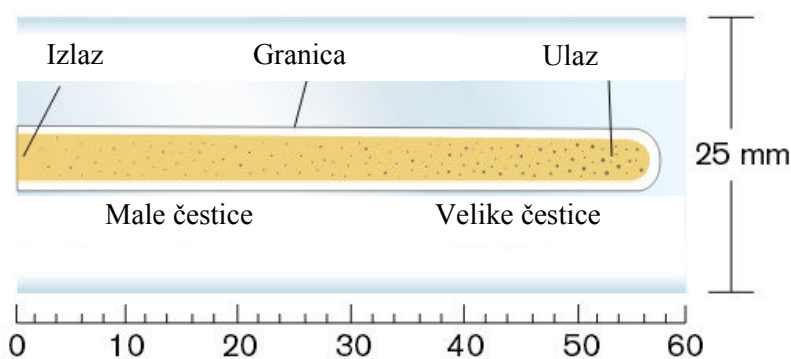
4.2.1. PRINCIP RADA

Ferrogram Maker djelovanjem magneta odvaja potrošene strojne čestice od ulja. Uzorak ulja prvo se razrjeđuje, a poslije razrijeđeni uzorak teče niz cijev na specijalno konstruiranom staklenom klizaču zvanom ferogram. Ferogram se nalazi na magnetskom

bloku, koji privlači željezne čestice iz ulja. Željezne čestice se spajaju u lance duž klizne površine. Veće čestice se slažu na ulazu. Neželjene čestice i nečistoće, koje ne privlači magnet, teku prema dolje i nasumično se slažu duž klizne površine. Nakon što se čestice poslože na ferogramu, slijedi pranje kojim se uklanja lubrikant koji je još ostao. Nakon pranja čestice ostaju stalno čvrsto posložene na kliznoj površini. Nakon toga je ferogram spreman za optičko ispitivanje koje se provodi na feroskopu.



Slika 4.4 Princip rada FM-6 [20]



Slika 4.5 Raspored čestica na ferogramu [20]

4.3. FEROSKOP FS-6

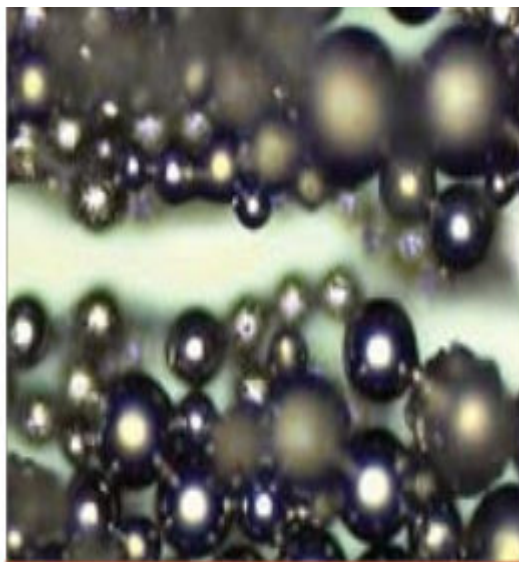
Feroskop FS-6 je optički mikroskop koji se koristi u analitičkoj ferografiji za identifikaciju čestica i njezinu interpretaciju. Sadrži tri snažna uvećanja – 100x, 500x, 1000x. Tehničar koji se služi feroskopom može brzo skenirati ferogram tražeći abnormalne čestice, te odrediti podrijetlo čestice i mehanizam trošenja pri povećanju od 500x, a može i vidjeti smjer naprezanja pri povećanju od 1000x, što znači da nam feroskop daje najvažnije podatke o

čestici, a pomoću tih podataka se možemo odlučit treba li dio zamijeniti, popraviti ili održavati.

FS-6 je opremljen sa reflektirajućim i transmitirajućim izvorom svjetlosti tako da ferogram može biti osvijetljen odozgo i odozdo. Ferogram osvijetljen crvenim svjetlom odozgo uzrokuje refleksiju svjetlosti od čestica, a zelenim svjetlom odozdo ferogram uzrokuje provođenje svjetla.



Slika 4.6 Feroskop FS-6 [20]



Slika 4.7 Pogled kroz feroskop [20]

4.4. SOFTVER ZA SNIMANJE SLIKA ISPITIVANOG DIJELA

Softver prikazuje snimljene slike, mjere i ima mogućnost povećanja slike. Omogućuje spremanje slika u različitim oblicima, tako da se mogu otvoriti na različitim programima. Snimljene slike se mogu spremiti u obliku; AVI, MPG, MPEG, JPEG i kao video zapis. Dobivena mjerenja se zapisuju u MS Excel te se tamo dalje analiziraju. Mjerna ljestvica korištena na pojedinoj slici se također može automatski prikazati na svakoj slici, te se tako brzo mjeri bilo koja veličina potrošene čestice. Sa ovim softverom se mogu brojati, mjeriti i interpretirati potrošene čestice u samo par minuta.



Slika 4.8 Softver za snimanje slika ispitivanog dijela [20]

5. VAŽNOST FEROGRAFIJE ZA ODRŽAVANJE

Mazivo je, kao kontaktni element sustava, nositelj informacija o stanju cijelog sustava sa aspekta triboloških i drugih procesa starenja. Zbog toga analiza ulja, ferografija na bazi pravilno definiranog programa predstavlja jako efektivnu metodu monitoringa stanja tehničkih sustava koja daje upozoravajuće znakove potencijalnih problema, koji vode prema kvaru i zastoju tehničkih sustava. U strukturi sustava osim mehaničkih komponenti, stanje mijenja i samo mazivo, što dovodi do gubitka podmazujućih svojstava. [21]

Postoje brojne mogućnosti za kontaminaciju ulja, a time i za njihovu degradaciju. Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji ne mogu se potpuno spriječiti, ali se mogu znatno usporiti, što je jako važno i za ulje i za tehnički sustav. Brzina i stupanj degradacije ulja proporcionalni su brzini i stupnju kontaminacije. Zbog toga je važno spriječiti brzu kontaminaciju ulja, prije i tijekom upotrebe. Spektar kontaminanata ulja dosta je širok, a svaki kontaminant djeluje destruktivno na ulje, umanjujući mu fizičko-kemijske i radne osobine, a konačne posljedice su skraćanje vijeka trajanja ulja i tehničkog sustava.

Na osnovu analize velikog broja kvarova složenih tribomehaničkih sustava može se zaključiti da je kod sustava kod kojeg je došlo do kvara, također došlo do određenih promjena i kod maziva. Naime, kvar tribomehaničkog sustava može nastupiti uslijed promjene svojstava ulja za podmazivanje, kao i uslijed kvara pojedinih elemenata sustava.

Velik broj uređaja i testova za analizu ulja su razvijeni i nastavljaju se razvijati, kao bi omogućili što kvalitetniji monitoring i dijagnosticiranje problema nastalih u procesu podmazivanja.

Činjenica je da je mazivo ulje odmah po punjenju u sustav koji podmazuje mehanički, termički i kemijski opterećeno. To postepeno dovodi do promjene osnovne i prvobitne strukture ulja. Zbog toga što su danas radni uvjeti za ulje sve teži, za nova konstruktivna rješenja, preporuke za interval zamjene ulja se više ne uklapaju i ne slažu za prvotnim.

Postoje razne mogućnosti za kontaminaciju ulja, a time i za njihovu degradaciju. Dva su osnovna tipa kontaminacije: kontaminacija ulja prije njegove upotrebe i kontaminacija ulja tijekom upotrebe.

Kod kontaminacije ulja prije upotrebe na relaciji od proizvođača do korisnika ulja postoji niz mogućnosti za njegovu kontaminaciju i degradaciju. Mogući kontaminanti su:

benzin, diesel gorivo, neka druga ulja, voda, prašina i drugi atmosferski kontaminanti. Svi oni štete ulju, te povećavaju rizik kvarenja dijelova sustava koji su u dodiru sa njim.

Kod kontaminacije ulja tokom upotrebe mijenjaju se tribološke osobine svih elemenata tribomehaničkog sustava. Čvrsti elementi trpe fizičke, a mazivo fizičke i kemijske promjene. Brzina degradacijskih procesa i promjena na svim elementima sustava ovisi o ukupnim radnim uvjetima pod kojima se odvijaju tribološki procesi u tribomehaničkom sustavu. Pošto su habanje i trenje dva glavna tribološka procesa svih elemenata tribomehaničkog sustava, a nastaju u istim okolnostima, postoji funkcionalna povezanost između njih i uvjeta rada koja se može utvrditi. To je upravo faktor na kojemu se zasniva dijagnostika stanja maziva, a preko nje i dijagnostika stanja dijelova tehničkog sustava.

Tijekom eksploatacije uslijed djelovanja različitih činioca mehaničkog, fizičkog i kemijskog karaktera odvijaju se procesi starenja, odnosno degradacije ulja kao sredstva za podmazivanje kod motornog vozila. Različitim mehanizmima degradacijskih procesa izloženi su svi elementi motora, elemenata za prijenos snage kao mehaničke kontaktne komponente, tako i ulje za podmazivanje. [22]

Ti degradacijski procesi izazivaju promjenu osnovnih, funkcionalnih karakteristika, što ima za posljedicu da vremenom nastaje kvar. Pod kvarom se u ovom smislu podrazumijeva promjena karakteristika komponente sustava koja izaziva prekid kontinuiteta eksploatacije. Pri tome kod ulja dolazi do promjene njegovih fizičko-kemijskih svojstava, trošenja aditiva, narušavanja oksidacijske i termičke stabilnosti, te smanjenja sposobnosti nošenja uljnih slojeva. Te promjene vremenom dostižu kritični nivo, što znači da ulje više nije u prihvatljivom stanju za upotrebu u sustavu. [23]

Degradacijski procesi predstavljaju sve procese uslijed kojih ulje za podmazivanje gubi mogućnost uspješnog obavljanja brojnih funkcija u sustavu, pa se i kontaminacija smatra kao element degradacije. Degradaciju ulja ne izazivaju samo kemijske promjene u baznom ulju, već i proces progresivnog gubitka osnovnih svojstava ulja, jer je najveći broj aditiva koncipiran da se troši ili mijenja tokom eksploatacije kako bi se spriječili procesi trenja i habanja. Gubitak efikasnosti aditiva ima za posljedicu gubitak mazivih svojstva ulja, prvenstveno aditiva koji inhibiraju neželjene pojave oksidacije, korozije, aditiva koji štite kontaktne površine od habanja. [24]

Postoji veliki broj različitih testova u okviru analize ulja koji se primjenjuju pri procjeni njegovog stanja. Testovi moraju pokriti: stanje tehničkog sustava, stanje nečistoća u mazivu i stanje maziva.

Sa aspekta stanja tehničkog sustava posebnu pažnju treba obratiti na pojavu i trend promjene broja metalnih čestica u ulju. Drugi fokus bi bilo stanje maziva, gdje je pažnju potrebno usmjeriti na promjenu viskoznosti, povećanje oksidacije i trošenja aditiva. Treći fokus bi bio stanje nečistoća u ulju, gdje je potrebno pažnju usmjeriti na količinu čestica, sadržaj vode i metalnih nečistoća.

Vršeći monitoring stanja maziva u mogućnosti smo izvršiti osvježanje ili zamjenu maziva prije nego što nastupe ozbiljnija oštećenja tehničkog sustava. Ako je oštećenje primijećeno u tijeku rada, zbog nečistoća u ulju ili problema vezanih za mazivo, stanje tehničkog sustava se može kontrolirati i odmah izvršiti prekid njenog rada u cilju smanjenja oštećenja. Postoje dva tipa upozorenja koja se koriste u analizi ulja: apsolutni i statistički alarm. Efikasna analiza ulja zasniva se na kombinaciji oba tipa.

Granica upozorenja predstavlja apsolutni alarm. Statistički trend, uzima u obzir promjenjivost, koja je posljedica uzorkovanja ulja, onečišćenja ulja i slično, te predstavlja standardnu devijaciju. Odstupanje od ove normalne promjenjivosti ukazuje na pojavu ozbiljnijih problema. Ovo odstupanje predstavlja prvi znak za poduzimanje mjera u cilju rješavanja nastalog problema. Kako se trend odstupanja približava granici upozorenja potrebno je poduzeti mjere kao što su zamjena ulja ili pročišćavanje ulja ili pregled tehničkog sustava.

Testovi i metode koje se koriste za ispitivanje svih problema povezanih sa uljem su opisane prije u radu, a njihova važnost za održavanje sustava je velika, jer otkrivaju stanje sustava te predviđaju potencijalne probleme, a tako štede vrijeme i novac ljudima.

5.1. PRIMJER FEROGRAFIJE [25]

Ispitivanja su provedena na benzinskom četverotaktnom motoru, proizvođača Briggs&Stratton, snage 4 kW. U svrhu opterećenja motora, kako bi se izazvalo njegovo trošenje na motor je spojen generator izmjenične struje i trošila u obliku električnih žarulja.

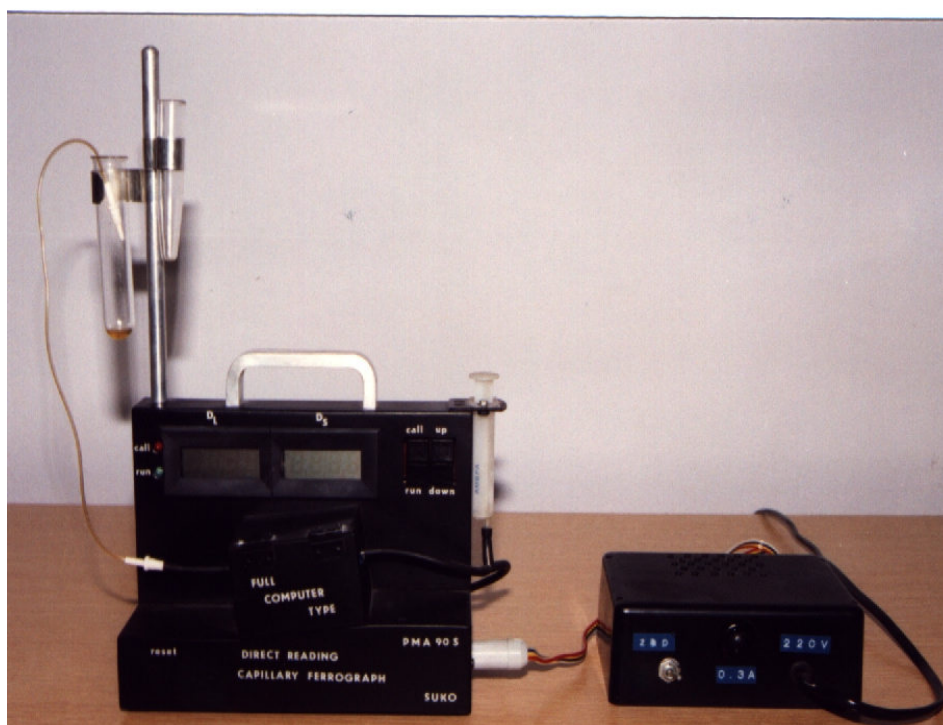
Odlučeno je da ispitivanje traje oko 400 sati, te da se uzorci ulja uzimaju svakih 12 sati, osim u razdoblju prve izmjene ulja kad su uzorci uzimani svaka 2 sata. Interval izmjene

ulja i vrsta ulja izabrani su prema preporuci proizvođača motora, koji preporučuje za naše klimatske uvjete ulje oznake SAE30 i zamjenu svakih 60 sati rada. Na osnovi tog traženja izabrano je INA-SUPER 3 tražene gradacije.

Sva potrebna ispitivanja provedena su na uređajima koji se nalaze u Laboratoriju za tribologiju, Zavod za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Korišteni uređaji su:

- ferograf s direktnim očitanjem – PMA 90 S
- uređaj za mjerenje ukupnog sadržaja zagađujućih tvari u ulju – TCM-U



Slika 5.1 Ferograf s direktnim očitanjem PMA 90 S



Slika 5.2 Uređaj TCM-U

5.2. REZULTATI ISPITIVANJA

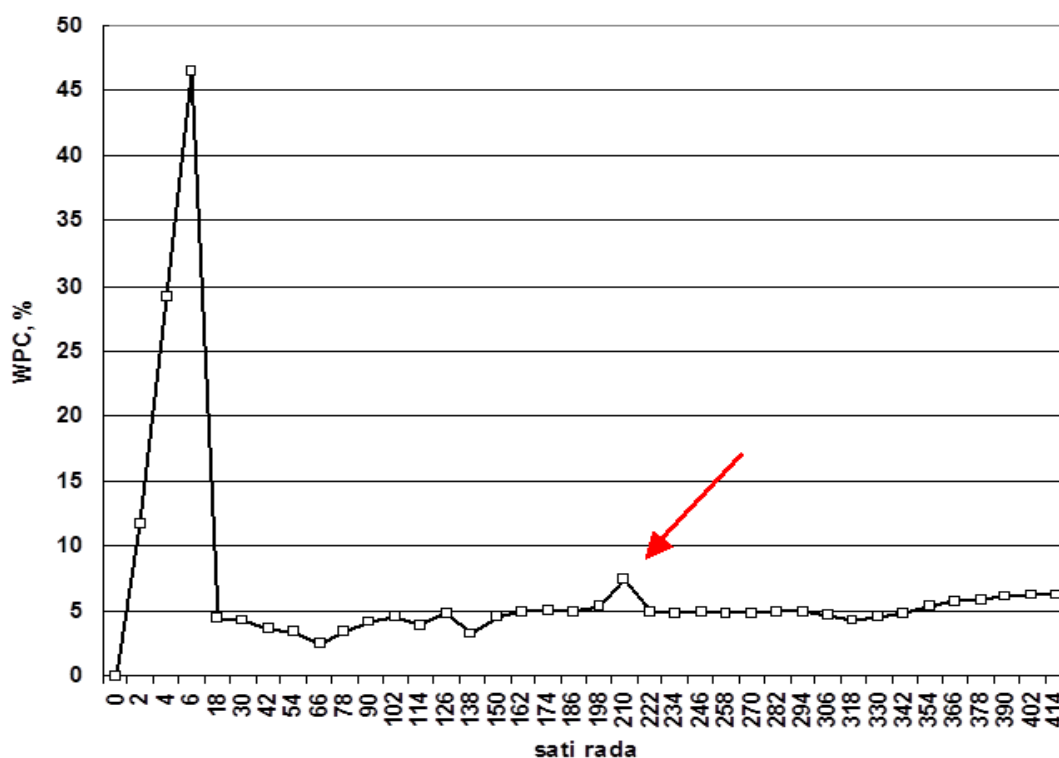
Rezultati mjerenja mogu se vidjeti u tablicama 5.1 i 5.2 U tablici 5.1 prikazane su vrijednosti WPC (Wear Particle Content) i TCM (Total Contaminants Measurement) za svih 37 uzoraka ulja. Za svaki uzorak mjerenje je ponovljeno tri puta, a na kraju je izračunata srednja vrijednost oba parametra.

Tablica 5.1 Izmjerene vrijednosti WPC i TCM za vrijeme trajanja ispitivanja

Uzorak broj	Sati rada	I mjerenje		II mjerenje		III mjerenje		Srednja vrijednost		Opaska
		WPC, %	TCM, %	WPC, %	TCM, %	WPC, %	TCM, %	WPC, %	TCM, %	
1	2	11,6	0,00	11,7	0,00	11,7	0,00	11,7	0,00	
2	4	29,2	0,06	29,3	0,05	29,2	0,06	29,2	0,06	
3	6	46,4	0,17	46,8	0,16	46,2	0,16	46,5	0,16	Zamjena ulja
4	18	4,4	0,00	4,5	0,00	4,4	0,00	4,4	0,00	
5	30	4,3	0,04	1,3	0,05	1,3	0,04	4,3	0,04	
6	42	3,3	0,07	3,7	0,07	3,8	0,07	3,6	0,07	
7	54	3,4	0,12	3,3	0,11	3,4	0,11	3,4	0,11	
8	66	2,5	0,13	2,6	0,13	2,5	0,13	2,5	0,13	Zamjena ulja
9	78	3,4	0,0	3,4	0,0	3,5	0,0	3,4	0,0	
10	90	4,2	0,03	4,2	0,03	4,1	0,04	4,2	0,03	
11	102	4,7	0,08	4,7	0,07	4,5	0,08	4,6	0,08	
12	114	3,9	0,09	4,0	0,10	3,9	0,10	3,9	0,10	
13	126	4,9	0,12	4,8	0,12	4,8	0,12	4,8	0,12	Zamjena ulja
14	138	3,3	0,00	3,2	0,00	3,3	0,00	3,3	0,00	
15	150	4,4	0,05	4,4	0,04	4,6	0,05	4,5	0,05	
16	162	5,0	0,07	5,0	0,07	5,0	0,07	5,0	0,07	
17	174	5,0	0,10	5,1	0,09	5,1	0,09	5,1	0,09	
18	186	2,1	0,13	5,0	0,15	5,0	0,13	5,0	0,14	Zamjena ulja
19	198	5,3	0,01	5,3	0,00	5,4	0,01	5,3	0,01	
20	210	7,4	0,02	7,5	0,02	7,4	0,01	7,4	0,02	Benzin u ulju
21	222	4,9	0,05	4,9	0,05	4,9	0,05	4,9	0,05	
22	234	4,7	0,08	4,8	0,08	4,8	0,07	4,8	0,08	
23	246	4,8	0,11	4,9	0,12	4,9	0,12	4,9	0,12	Zamjena ulja
24	258	4,9	0,01	4,8	0,00	4,8	0,01	4,8	0,00	
25	270	4,7	0,02	4,8	0,04	4,8	0,04	4,8	0,03	
26	282	4,9	0,08	4,8	0,06	4,9	0,08	4,9	0,07	

27	294	5,0	0,13	5,0	0,14	5,0	0,13	5,0	0,14	
28	306	4,7	0,02	4,8	0,02	4,7	0,02	4,7	0,02	Zamjena ulja
29	318	4,3	0,05	4,4	0,06	4,3	0,06	4,3	0,06	
30	330	4,5	0,09	4,6	0,09	4,6	0,10	4,6	0,09	
31	342	4,9	0,11	4,7	0,11	4,8	0,11	4,8	0,11	
32	354	5,3	0,14	5,2	0,15	5,4	0,15	5,1	0,15	
33	366	5,7	0,02	8,8	0,02	5,7	0,03	5,7	0,02	Zamjena ulja
34	378	6,0	0,09	5,9	0,09	5,9	0,09	5,9	0,09	
35	390	6,1	0,13	6,1	0,13	6,0	0,12	6,1	0,13	
36	402	6,0	0,15	6,2	0,16	6,2	0,15	6,2	0,15	
37	414	6,3	0,18	6,2	0,18	6,3	0,18	6,3	0,18	

Parametar WPC ukazuje na intenzitet trošenja, tj. stanje motora, dok TCM govori o stanju ulja. Vrijednosti parametra WPC u ovisnosti o vremenu prikazani su na slici 5.3. Iz slike se može vidjeti da nakon početnog rasta broja čestica trošenja, što se može pripisati razdoblju uhadavanja motora, krivulja broja čestica trošenja ima lagani porast što se objašnjava kao normalno trošenje motora.



Slika 5.3 Promjena WPC-a po vremenu

Jedini ispad je u 210. satu rada kada nastaje naglo povećanje broja čestica. To je bio znak za detaljniji pregled prilikom čega je utvrđena prisutnost goriva u spremniku ulja. Nakon što je utvrđen i otklonjen razlog miješanja benzina u ulju, trend rasta broja čestica trošenja WPC odvijao se po istoj zakonitosti.

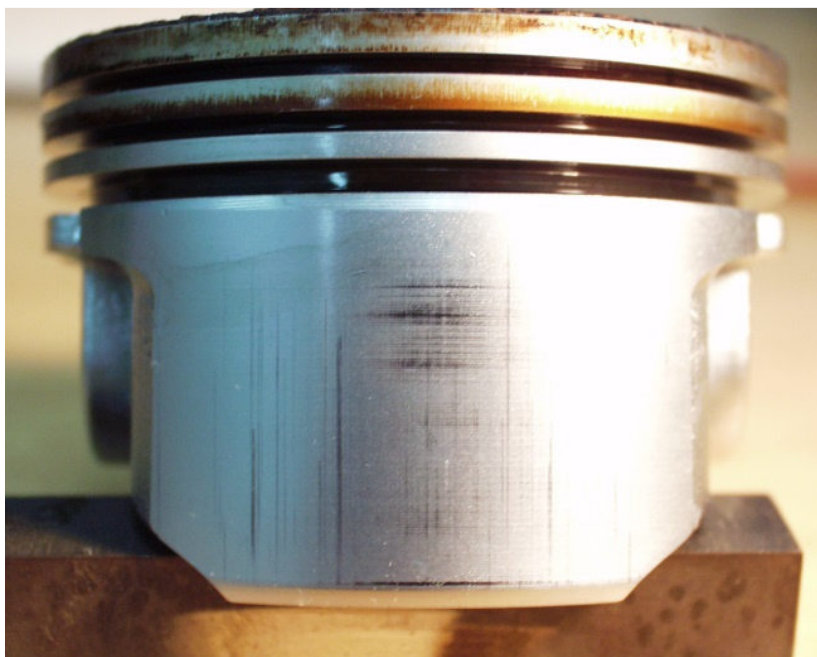
Vrijednosti TCM nisu prikazane dijagramom jer su promjene na ulju bile toliko male da su zanemarive. To se može objasniti kvalitetom ulja, ali i kratkoćom intervala zamjene ulja (samo 60 sati)

Osim ove analize načinjeno je ispitivanje ulja u laboratorijima INA Maziva Rijeka. Rezultati te analize mogu se vidjeti u tablici 5.2. Ispitivano je ulje nakon svake izmjene pa je tako dobiveno 8 uzoraka.

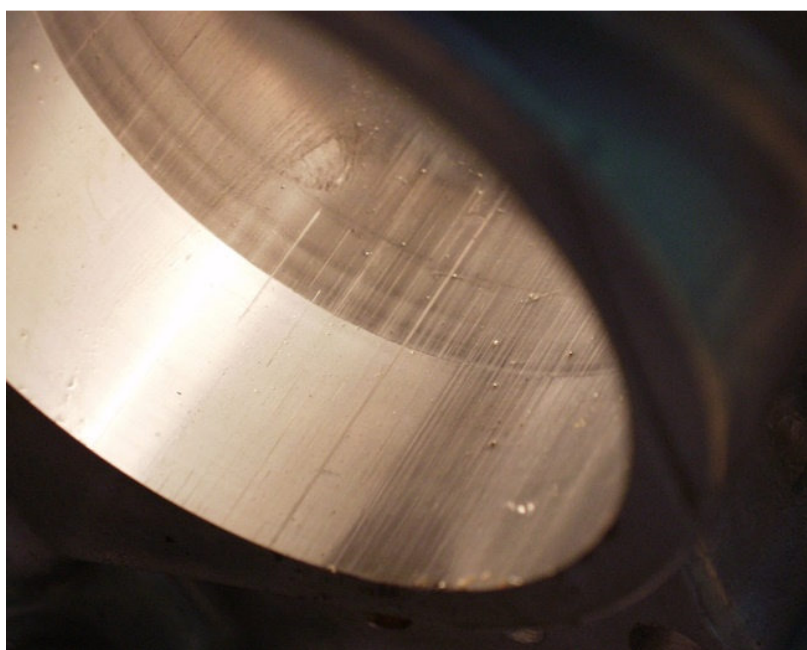
Tablica 5.2 Promjena svojstava ulja i sadržaja metala u ulju za vrijeme trajanja ispitivanja

Br	Svojstvo	Metoda	Jedinica mjere	Izmjena ulja							
				I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Sati rada motora		Sat	6	66	126	186	246	306	366	414
2	Viskoznost na 100°C	ASTM D445	mm ² /s	10,22	10,87	10,74	10,5	10,15	10,31	10,15	9,95
3	Ukupni bazni broj, TBN	ASTM D2896	mgKOH/g	9,1	9,3	9,5	9,6	9,5	9,5	9,5	9,8
4	Netopljivo u n-pentanu	ASTM D893	%m/mm	0,02	0,03	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	0,01
5	Metali: CA	ICP-OES	mg/kg	2820	3100	3070	3060	3000	3040	3070	3380
6	P	ICP-OES	mg/kg	946	897	911	918	932	949	950	517
7	Zn	ICP-OES	mg/kg	1090	1070	1060	1050	1080	1070	1070	919
8	Fe	ICP-OES	mg/kg	18	14	14	21	59	29	20	20
9	Cr	ICP-OES	mg/kg	3	3	2	2	4	3	2	2
10	Mo	ICP-OES	mg/kg	8	3	2	2	3	1	2	2
11	Sn	ICP-OES	mg/kg	5	14	24	31	14	21	19	15
12	Pb	ICP-OES	mg/kg	23	8	6	10	10	4	4	5
13	Cu	ICP-OES	mg/kg	21	4	2	2	30	1	1	1
14	Na	ICP-OES	mg/kg	12	7	6	6	8	6	6	4
15	Mg	ICP-OES	mg/kg	122	22	13	13	15	12	12	22
16	B	ICP-OES	mg/kg	18	0	0	0	4	0	0	0
17	Al	ICP-OES	mg/kg	20	9	7	7	40	13	8	8
18	V	ICP-OES	mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0
19	Si	ICP-OES	mg/kg	15	5	4	4	18	7	4	5

I ovo istraživanje potvrdilo je povećano trošenje (povećan udio Fe, Cu, Al i Si – zasjenjena polja) za razdoblje u kojem je došlo do miješanja goriva u ulju. Na slikama 5.4 i 5.5 se mogu vidjeti tragovi trošenja na klip i cilindru



Slika 5.4 Tragovi trošenja na klipu [25]



Slika 5.5 Tragovi trošenja na cilindru [25]

Redovitim praćenjem vrijednosti WPC mogu se na vrijeme uočiti počevši intenzivnog trošenja što je signal da je potrebno provesti određene zahvate kako bi se izbjegli zastoji. U tom se slučaju analizom veličine, oblika i boje čestica trošenja može donijeti procjena o mehanizmu trošenja, a analizom kemijskog sastava čestica trošenja indicirati mjesto trošenja odnosno dio koji se troši.

6. ZAKLJUČAK

Analizom ulja koja se koriste u tehničkim sustavima došlo se do zaključka da je ulje jedno do bitnijih dijelova sustava na koje se treba obratiti velika pažnja. U ulju se nalaze brojne informacije o stanju tehničkog sustava, koje mogu upozoriti da u sustavu nešto nije u redu te ukazati o kakvom se problemu radi. To je od velike koristi ljudima koji održavaju sustav jer mogu odmah reagirati da bi produžili vijek nekog dijela ili cijelog sustava.

Tijekom upotrebe ulja mijenjaju se fizičko-kemijske osobine ulja, te je nužno voditi računa o onečišćavanju ulja sa aspekta udjela vode i čestica koje mogu imati izrazito štetan utjecaj na radni vijek tehničkog sustava i ulja. Ispravno održavanje ulja povećava radnu sposobnost tehničkog sustava, produžava njegov radni vijek kao i vijek trajanja ulja. Smanjuju se kvarovi sustava, kao i troškovi popravka, što je u trenutnom financijskom stanju jedno od bitnijih stvari.

Danas se za dijagnosticiranje tribomehaničkog sustava primjenjuju različite fizičko-kemijske metode i tribološke metode. Iskustva iz eksploatacije tehničkih sustava su pokazala da je prognoziranje neispravnosti najefikasnije na osnovu parametara koji su pouzdani pokazatelj procesa habanja čestica koje nastaju habanjem. Ulje je, kao kontakti element tribomehaničkog sustava nosioc informacija o stanju cijelog sustava s aspekta triboloških i drugih procesa starenja. Zbog te velike važnosti ulja razvila se i potreba za metodama analize ulja, pa su se razvile razne metode od kojih je najznačajnija ferografija. Ona daje podatke o česticama koje se nalaze u ulju, te ih obrađuje i ukazuje na stupanj trošenja dijela, te na moguće kvarove u budućnosti ako se dio ne održava ili ne promjeni. To je izuzetno bitno za tehničke sustave, jer se na taj način može produžiti vijek trajanja proizvoda, a time i uštedjeti vrijeme i novac. Na osnovu analize velikog broja kvarova složenih tribomehaničkih sustava može se zaključiti da je kod sustava kod kojeg je došlo do kvara, također došlo do određenih promjena i kod maziva, što dokazuje da ulje ima ogromnu važnost za sustav u kojem se nalazi i da se ispitivanjem ulja dolazi do izuzetno bitnih podataka za sustav. Zbog velike uloge ulja u tehničkim sustavima kaže se da je ulje „životna krv“ strojeva.

7. LITERATURA

- [1] Paresh Haribhakti: An introduction to ferrography
- [2] Žarko Koboević: Ferografija u održavanju motora i strojeva, 2000.
- [3] Machinery lubrication, <http://www.machinerylubrication.com/Read/5/analytical-ferrography>
- [4] Machinery lubrication, <http://www.machinerylubrication.com/Read/302/gear-lube>
- [5] Reliability web, http://www.reliabilityweb.com/art05/wear_particle-analysis.htm
- [6] Azom.com, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3394>
- [7] Marijan Kolombo: Ferografija jučer i danas, 2008.
- [8] U.S. Department of energy: Operation & maintenance, 2010.
- [9] CSC Scientific Company, Inc., <http://www.cscscientific.com/moisture/karl-fischer/>
- [10] CSC Scientific Company, Inc., http://www.cscscientific.com/moisture/karl-fischer/volumetric-titrators?&__hssc=&__hstc&hsCtaTracking=834bed16-c46f-4e90-9179-51faacc5250f57b454e3-7aef-409d-9cfa-97ae9441c1e2
- [11] CSC Scientific Company, Inc., http://www.cscscientific.com/moisture/karl-fischer/coulometric-titrators---aquapal-iii/?&__hssc=&__hstc&hsCtaTracking=fe8d5a31-d87a-4c62-ae92-2e80d09f553828f7b3ed-b8a1-4df1-8c3d-072fdc745672
- [12] Innovation services, <http://www.innovationservices.philips.com/sites/default/files/materials-analysis-icp-aes.pdf>
- [13] Kuleuven.be, <http://sirius.mtm.kuleuven.be/Research/Equipment/Chemical/icp-oes.html>
- [14] Polarislabs.com, <http://www.polarislabs.com/particle-count.php>
- [15] Cat.com, <http://pdf.cat.com/cda/files/2518336/7/PEGJ0045-00.pdf>
- [16] Machinery lubrication, <http://www.machinerylubrication.com/Read/411>
- [17] Caltech.edu, <http://mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf>
- [18] Machinery lubrication, <http://www.machinerylubrication.com/Read/1052/acid-number-test>
- [19] R. Perić, Sreten: Savremene metode analize ulja u tehničkim sistemima, 2009.
- [20] Tricocorp.com, http://www.tricocorp.com/pdf-files/lab_instruments.pdf
- [21] Taylor, R. I., Coy, R. C., Improved fuel efficiency by lubricant design, 2001.
- [22] Piest, M., Taylor, C. M., Automobile engine tribology, 2000.

- [23] Troyer, D., Fitch, J., Oil Analysis Basics, Noria Corporation, 1999.
- [24] Babić, M., Monitoring ulja za podmazivanje, 2004.
- [25] Gojko Marić, Vinko Ivušić: Praćenje trošenja četverotaktnog motora analizom ulja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zavod za materijale, 2002.